

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Metody samočinného nastavování PID regulátorů

Bc. Pavel Konfršt

Diplomová práce

2014

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel Konfršt**
Osobní číslo: **I12517**
Studijní program: **N2646 Informační technologie**
Studijní obor: **Řízení procesů**
Název tématu: **Metody samočinného nastavování PID regulátorů**
Zadávací katedra: **Katedra řízení procesů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cíl práce:

Cílem práce je teoretický rozbor metod samočinného nastavování (self-tuning resp. auto-tuning) PID regulátorů používaných v průmyslové regulaci. Součástí práce bude porovnání a zhodnocení vybraných metod na základě simulačních experimentů v prostředí Matlab Simulink. Sledovány budou především způsoby získání popisu řízeného procesu, možnosti specifikace cílů řízení uživatelem (definice rychlosti odezvy, velikosti překmitu apod.) a techniky výpočtu parametrů regulátoru. V praktické části budou vybrané metody testovány s využitím specializovaného softwaru na regulátorech PMA dostupných v laboratoři.

Teoretická část:

Stručná rešerše problematiky týkající se multifunkčních průmyslových regulátorů. Teoretický rozbor metod samočinného nastavování PID regulátorů používaných v průmyslové regulaci.

Implementační část:

Vytvoření skriptů v Matlabu a modelů v Simulinku. Provedení experimentů s regulátorem KS 90-1 připojeným k PC v prostředí BlueControl Expert a s využitím aplikace PMA Tune. Softwarová implementace řídicích algoritmů v prostředí ET/KS 98. Ověření funkce na základě simulace v prostředí SIM/KS 98 a s regulátorem KS 98-1 připojeným k PC.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

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

Seznam odborné literatury:

- [1] BOBÁL, V.; BÖHM, J.; FESSL, J.; MACHÁČEK, J. Digital Self-tuning Controllers: Algorithms, Implementation and Application. Londýn: Springer, 2005. 317 s. ISBN 978-1-85233-980-7.
- [2] ASTRÖM, K.; HÄGGLUND, T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. 2 vyd. Research Triangle Park (USA): Instrument Society of America, 1995. 343 s. ISBN 1-55617-516-7.
- [3] HLAVA, J. Prostředky automatického řízení II: analogové a číslicové regulátory, elektrické pohony, průmyslové komunikační systémy. Praha: ČVUT, 2000. 160 s. ISBN 80-01-02221-8.
- [4] KLÁN, P. Komerčně využívané pokročilé metody nastavování PID regulátorů. Automa, ročník 15 (2009), č. 12, s. 14 - 18. ISSN 1210-9592.
- [5] KUPKA, L.; JANEČEK, J. Matlab & Simulink: řešené příklady. Lanškroun: TG tisk a SOŠ a SOU, 2007. 224 s. ISBN 978-80-239-9532-9.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Libor Kupka, Ph.D.

Katedra řízení procesů

Datum zadání diplomové práce:

31. října 2013

Termín odevzdání diplomové práce:


16. května 2014



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan



L.S.



Ing. Daniel Honc, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. listopadu 2013

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 15. 05. 2014

Bc. Pavel Konfršt

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu Ing. Liboru Kupkovi, Ph.D., za odborné vedení v průběhu řešení diplomové práce. Dále bych rád poděkoval celé své rodině, za podporu a financování po dobu studia a také svým přátelům.

V Pardubicích dne 15. 05. 2014

Bc. Pavel Konfršt

ANOTACE

Cílem práce je teoretický rozbor metod samočinného nastavování PID regulátorů používaných v průmyslové regulaci. Součástí práce bude porovnání a zhodnocení vybraných metod na základě simulačních experimentů v prostředí Matlab – Simulink. Sledovány budou především způsoby získání popisu řízeného procesu, možnosti specifikace cílů řízení uživatelem (definice rychlosti odezvy, velikosti překmitu apod.) a techniky výpočtu parametrů regulátoru. V praktické části budou vybrané metody testovány s využitím specializovaného softwaru na regulátorech PMA dostupných v laboratoři.

KLÍČOVÁ SLOVA

Autotuning, PID regulátory, Matlab – Simulink, Průmyslový regulátor, Regulace

TITLE

Methods of self-tuning PID controllers

ANNOTATION

Objective:

The aim of this work is the theoretical analysis of the self-adjustment methods PID controllers used in industrial control. Part of the work will be to compare and evaluate the selected methods based on simulation experiments in Matlab – Simulink. Monitoring will mainly describe ways of obtaining a controlled process, the possibility of a user specification of management objectives (definition of response speed, size overshoot, etc.) and the technique of calculating the parameters. The practical part contain the testing of the selected method by using specialized software to PMA controllers available in the laboratory.

KEYWORDS

Autotuning, PID controlers, Matlab – Simulink, Industrial controller, Regulation

Obsah

| | |
|---|-----------|
| SEZNAM ZKRATEK | 9 |
| SEZNAM SYMBOLŮ | 10 |
| SEZNAM OBRÁZKŮ | 11 |
| SEZNAM TABULEK..... | 13 |
| ÚVOD..... | 15 |
| 1 REGULAČNÍ OBVOD..... | 16 |
| 1.1 PID REGULÁTOR..... | 18 |
| 1.1.1 Proporcionální složka | 18 |
| 1.1.2 Integrovaná složka | 19 |
| 1.1.3 Derivační složka | 20 |
| 1.2 TVARY PID REGULÁTORU | 21 |
| 2 ČÍSLICOVÝ REGULÁTOR | 25 |
| 2.1 DISKRETIZACE PID REGULÁTORU | 27 |
| 2.2 TVARY PSD REGULÁTORU | 30 |
| 3 PRŮMYSLOVÉ REGULÁTORY..... | 33 |
| 3.1 REGULÁTOR KS 90-1 | 33 |
| 3.2 REGULÁTOR KS 98-1 | 34 |
| 4 AUTO-TUNING..... | 36 |
| 5 METODY SAMOČINNÉHO NASTAVOVÁNÍ REGULÁTORŮ | 38 |
| 5.1 METODA OPTIMÁLNÍHO MODULU | 38 |
| 5.2 METODA LIMITNÍHO CYKLU | 39 |
| 5.3 METODA EXACT..... | 40 |
| 5.4 METODA VYCHÁZEJÍCÍ Z PŘECHODOVÉ CHARAKTERISTIKY | 41 |
| 5.5 METODY VYUŽÍVANÉ V SOFTWAREM PROGRAMU ET/KS98 | 42 |
| 5.6 METODY VYUŽÍVANÉ V PROSTŘEDÍ PMA TUNE | 45 |
| 5.7 METODY VYUŽÍVANÉ V PROSTŘEDÍ BLUECONTROL EXPERT..... | 48 |
| 6 KRITÉRIA KVALITY REGULAČNÍHO POCHODU..... | 50 |
| 6.1 KRITÉRIUM LINEÁRNÍ REGULAČNÍ PLOCHY – IE | 50 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 6.2 | ABSOLUTNÍ REGULAČNÍ PLOCHA – IAE, ITAE | 51 |
| 6.3 | KVADRATICKÁ REGULAČNÍ PLOCHA – ISE | 52 |
| 7 | SIMULACE A OVĚŘENÍ..... | 53 |
| 7.1 | PROSTŘEDÍ BLUECONTROL EXPERT | 53 |
| 7.2 | APLIKACE PMATUNE | 54 |
| 7.3 | SIMULACE V PROSTŘEDÍ MATLAB AND SIMULINK | 56 |
| 7.3.1 | Metoda kritických kmitů | 56 |
| 7.3.2 | Metoda přechodové odezvy | 58 |
| 8 | VYHODNOCENÍ..... | 60 |
| 9 | ZÁVĚR..... | 73 |
| | PŘÍLOHA A – VÝZNAM OPTIMALIZAČNÍCH KÓDŮ [PROFESS, 2006]..... | 1 |
| | PŘÍLOHA B – OBSAH CD | 1 |

Seznam zkratek

| | |
|----------|--|
| A/D | Analogově digitální převodník |
| D/A | Digitálně analogový převodník |
| EEPROM | Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory |
| EPROM | Erasable Programmable Read-Only Memory |
| MATLAB | Matrix Laboratory |
| ORO | Otevřený regulační obvod |
| PC | Personal computer |
| PID | Proporcionálně-integračně-derivační regulátor |
| PIR | Detekce ustáleného stavu |
| Profibus | Process Field Bus |
| PSD | Proporcionálně-sumačně-diferenční regulátor |
| RAM | Random-access memory |
| ROM | Read-Only Memory |
| TIA/EIA | Electronics Industries Association/Telecommunications Industry Association |
| URO | Uzavřený regulační obvod |

Seznam symbolů

| | |
|----------------|--|
| $\nabla u(kT)$ | přírůstek akční veličiny v k-tém kroku |
| A | amplituda vstupního signálu |
| d | tlumení |
| $D(kT)$ | náhrada derivace v diskrétní časové oblasti |
| $d(t)$ | porucha na vstupu soustavy |
| d_{max} | maximální hodnota tlumení |
| $e(t)$ | regulační odchylka |
| $I(kT)$ | náhrada integrálu v diskrétní časové oblasti |
| M | amplituda výstupní reléové nelinearity |
| $n(t)$ | porucha na výstupu soustavy |
| r_0 | proporcionální složka |
| r_1 | derivační složka |
| r_{-1} | integrační složka |
| t | diskrétní časový okamžik |
| T | perioda vzorkování |
| T_d | derivační časová konstanta |
| T_i | integrační časová konstanta |
| T_p | perioda kmitu |
| $u(t)$ | akční veličina |
| $w(t)$ | žádaná veličina |
| $y(t)$ | regulovaná veličina |
| z | překmit |
| z_{max} | maximální hodnota překmitu |
| τ | časová konstanta |

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obrázek 1.1 – Otevřený regulační obvod | 16 |
| Obrázek 1.2 – Uzavřený regulační obvod | 17 |
| Obrázek 1.3 – Příklad přenosové funkce P složky | 19 |
| Obrázek 1.4 – Příklad přenosové funkce I složky | 20 |
| Obrázek 1.5 – Příklad přenosové funkce D složky | 21 |
| Obrázek 1.6 – Paralelní tvar PID regulátoru [SCHLEGEL, 2003] | 22 |
| Obrázek 1.7 – Přenosová funkce PID regulátoru s aproximovanou derivací | 22 |
| Obrázek 1.8 – Sériový tvar PID regulátoru [SCHLEGEL, 2003] | 23 |
| Obrázek 2.1 – Blokové schéma číslicového regulátoru [Hlava, 2000] | 25 |
| Obrázek 2.2 – Zpětná obdélníková náhrada [HYNIOVÁ, 2011] | 28 |
| Obrázek 2.3 – Dopředná obdélníková náhrada [HYNIOVÁ, 2011] | 28 |
| Obrázek 2.4 – Lichoběžníková náhrada [HYNIOVÁ, 2011] | 29 |
| Obrázek 2.5 – Zpětná diference [HYNIOVÁ, 2011] | 29 |
| Obrázek 3.1 – Regulátor KS 90-1 [PMA, 2012] | 34 |
| Obrázek 3.2 – Regulátor KS 98-1 [PMA, 2012] | 35 |
| Obrázek 5.1 – Princip samočinně se nastavujícího regulátoru pomocí reléové zpětné vazby [Hlava, 2000] | 39 |
| Obrázek 5.2 – Odezvy na skokové změny žádané hodnoty a poruchové veličiny [Hlava, 2000] | 40 |
| Obrázek 5.3 – Přejít na stránku self-tuning [PROFESS, 2006] | 44 |
| Obrázek 5.4 – Průběh self-tuningu [PROFESS, 2006] | 44 |
| Obrázek 5.5 – Použitelné typy procesů pro PMA Tune [PROFESS, 2006] | 45 |
| Obrázek 5.6 – Uživatelské prostředí PMA Tune [REX CONTROLS, 2003] | 47 |
| Obrázek 5.7 – Typický průběh ladicího experimentu [REX CONTROLS, 2003] | 48 |
| Obrázek 6.1 – Lineární regulační plocha – IE [ŠČEVÍK, 2008] | 51 |
| Obrázek 6.2 – Absolutní regulační plocha – IAE [ŠČEVÍK, 2008] | 51 |
| Obrázek 6.3 – Kvadratická regulační plocha [ŠČEVÍK, 2008] | 52 |
| Obrázek 7.1 – skoková funkce při startu + impulzní na žádané hodnotě | 53 |
| Obrázek 7.2 – impulzní funkce při startu i na žádané hodnotě | 54 |
| Obrázek 7.3 – pouze skoková funkce při startu | 54 |
| Obrázek 7.4 – Ladicí proces regulátoru KS90-1 v prostředí PMATune | 55 |
| Obrázek 7.5 – Ladicí proces regulátoru KS90-1 v prostředí BlueControl | 56 |

| | |
|--|----|
| Obrázek 7.6 – Relé ve zpětné vazbě [KORBALE, 2011] | 57 |
| Obrázek 7.7 – Oscilace vstupních a výstupních veličin | 57 |
| Obrázek 7.8 – Základní parametry přechodové odezvy [KUPKA, 2008]..... | 59 |
| Obrázek 8.1 – Regulační průběh regulátoru KS/90-1, metoda skokové funkce při startu + impulzní na žádané hodnotě..... | 62 |
| Obrázek 8.2 – Regulační průběh regulátoru KS/90-1, metoda impulzní funkce při startu i na žádané hodnotě..... | 63 |
| Obrázek 8.3 – Regulační průběh regulátoru KS/90-1, metoda skokové funkce při startu | 64 |
| Obrázek 8.4 – Regulační průběh regulátoru KS/90-1, seřízení pomocí PMA Tune – normální rychlost smyčky | 65 |
| Obrázek 8.5 – Regulační průběh regulátoru KS/90-1, seřízení pomocí PMA Tune – rychlá rychlost smyčky | 66 |
| Obrázek 8.6 – Regulační průběh regulátoru KS/98-1, použití bloku CONTR..... | 67 |
| Obrázek 8.7 – Regulační průběh regulátoru KS/98-1, použití bloku PIDMA | 68 |
| Obrázek 8.8 – Regulační průběh regulátoru KS/98-1, seřízení pomocí PMA Tune – normální rychlost smyčky | 69 |
| Obrázek 8.9 – Regulační průběh regulátoru KS/98-1, seřízení pomocí PMA Tune – rychlá rychlost smyčky | 70 |
| Obrázek 8.10 – Regulační průběh při seřízení pomocí relé ve zpětné vazbě | 71 |
| Obrázek 8.11 – Regulační průběh při seřízení z průběhu přechodové charakteristiky | 72 |

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tabulka 3.1 – Základní parametry regulátoru KS 90-1 | 34 |
| Tabulka 3.2 – Základní parametry regulátoru KS 98-1 | 35 |
| Tabulka 5.1 – Nastavení konstant regulátoru [PROFESS, 2006]..... | 43 |
| Tabulka 7.1 – Ziegler-Nicholsova metoda z kritických parametrů | 58 |
| Tabulka 7.2 – Ziegler-Nicholsova metoda přechodové charakteristiky | 59 |
| Tabulka 8.1 – Regulátor KS/90-1 | 60 |
| Tabulka 8.2 – Regulátor KS/98-1 | 61 |
| Tabulka 8.3 – Metody Zieglera Nicholse | 61 |
| Tabulka 8.4 – Kritéria kvality regulátoru KS/90-1, metoda skokové funkce při startu + impulzní na žádané hodnotě..... | 62 |
| Tabulka 8.5 – Parametry regulátoru KS/90-1 získané pomocí skokové funkce při startu + impulzní na žádané hodnotě..... | 62 |
| Tabulka 8.6 – Kritéria kvality regulátoru KS/90-1, metoda impulzní funkce při startu i na žádané hodnotě..... | 63 |
| Tabulka 8.7 – Parametry regulátoru KS/90-1 získané pomocí impulzní funkce při startu i na žádané hodnotě..... | 63 |
| Tabulka 8.8 – Kritéria kvality regulátoru KS/90-1, metoda skokové funkce při startu | 64 |
| Tabulka 8.9 – Parametry regulátoru KS/90-1 získané pomocí skokové funkce při startu | 64 |
| Tabulka 8.10 – Kritéria kvality regulátoru KS/90-1, seřízení pomocí PMA Tune – normální rychlost smyčky | 65 |
| Tabulka 8.11 – Parametry regulátoru KS/90-1 získané pomocí PMA Tune – normální rychlost smyčky | 65 |
| Tabulka 8.12 – Kritéria kvality regulátoru KS/90-1, seřízení pomocí PMA Tune – rychlá rychlost smyčky | 66 |
| Tabulka 8.13 – Parametry regulátoru KS/90-1 získané pomocí PMA Tune – rychlá rychlost smyčky | 66 |
| Tabulka 8.14 – Kritéria kvality regulátoru KS/98-1, použití bloku CONTR..... | 67 |
| Tabulka 8.15 – Parametry regulátoru KS/98-1, použití bloku CONTR..... | 67 |
| Tabulka 8.16 – Kritéria kvality regulátoru KS/98-1, použití bloku PIDMA..... | 68 |
| Tabulka 8.17 – Parametry regulátoru KS/98-1, použití bloku PIDMA..... | 68 |
| Tabulka 8.18 – Kritéria kvality regulátoru KS/98-1, seřízení pomocí PMA Tune – normální rychlost smyčky | 69 |

| | |
|---|----|
| Tabulka 8.19 – Parametry regulátoru KS/98-1, získané pomocí PMA Tune – normální rychlost smyčky | 69 |
| Tabulka 8.20 – Kritéria kvality regulátoru KS/98-1, seřízení pomocí PMA Tune – rychlá rychlost smyčky | 70 |
| Tabulka 8.21 – Parametry regulátoru KS/98-1, získané pomocí PMA Tune – rychlá rychlost smyčky | 70 |
| Tabulka 8.22 – Kritéria kvality regulátoru při seřízení pomocí relé ve zpětné vazbě | 71 |
| Tabulka 8.23 – Parametry regulátoru získané pomocí relé ve zpětné vazbě | 71 |
| Tabulka 8.24 – Kritéria kvality regulátoru při seřízení z průběhu přechodové charakteristiky | 72 |
| Tabulka 8.25 – Parametry regulátoru získané při seřízení z průběhu přechodové charakteristiky | 72 |

Úvod

Automatizace nachází v dnešní době uplatnění téměř ve všech odvětvích průmyslové výroby. S automatizací je velmi spojen pojem regulace. Nezbytností ke správné regulaci je přítomnost zpětné vazby. Od třicátých let minulého století je nejpoužívanější zpětnovazební regulátor typu PID. Je složen ze tří složek proporcionální, integrační a derivační. Jedná se zpravidla o tři různé zásahy na regulační odchylku. Je uváděno, že až 90 % veškeré regulace v průmyslu je osazena právě zmíněným PID regulátorem. Správné nastavení zmiňovaných tří složek PID regulátoru má velmi pozitivní ekonomické důsledky na průmyslovou automatizaci. Odhaduje se, že až 70 % regulátorů není v průmyslu vhodně nastaveno.

Z počátku bylo nastavování PID regulátoru výhradně experimentální záležitostí, ale v roce 1942 vznikl souhrn nastavujících pravidel sepsaný inženýry Johnem G. Zieglerem a Nathanielem B. Nicholsem. Jednalo se o empirická pravidla pro nastavení regulátorů. Tyto pravidla se s různou modifikací staly nejrozšířenějšími metodami v nastavování regulátorů. Do dnešní doby byla vypracována řada postupů a optimalizačních metod, které výrobci v praxi velmi úspěšně využívají.

S příchodem číslicových regulátorů přišla myšlenka tyto metody zautomatizovat. Jedná se o automatický proces, který provede jednorázové nastavení regulátoru před uvedením do provozu, eventuálně na povel operátora. Regulátor vyvolá v soustavě nějakou poruchu a vyhodnotí odezvu soustavy, ze které vypočte parametry regulátoru. V dnešní době každý výrobce aplikuje do průmyslového regulátoru svůj algoritmus pro samočinné nastavení parametrů regulátoru.

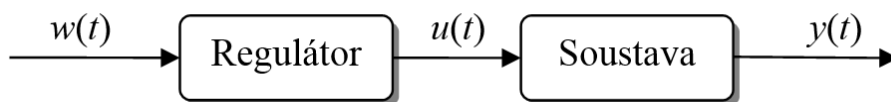
Cílem této práce je přispět k problematice samočinného nastavování regulátoru a ukázat, jaké teoretické postupy v nastavování parametrů PID regulátoru se dostaly do firemního využití. První část je věnována teoretickému úvodu do automatického řízení. Druhá část se věnuje problematice auto-tuningu, jaké metody využívají firmy vyrábějící samočinně se nastavující regulátory. V poslední části diplomové práce je provedeno měření ve školní laboratoři, kde na regulátorech KS/90-1 a KS/98-1 je vyzkoušeno několik metod, které německá firma PMA nabízí. Dále jsou uvedeny dva algoritmy v programu MATLAB, které vychází ze Ziegler-Nicholsových vztahů. Výsledky jsou porovnány pomocí skriptu vytvořeného v MATLABU, který vyčísluje integrační kritéria, hodnotu maximálního překmitu, dobu regulace atd.

1 Regulační obvod

Pod pojmem řízení systémů si lze představit posloupnost předem stanovených zásahů, které vedou k předem známému cíli. Řízením se rozumí přinutit systém, aby se regulovaná veličina (výstup ze systému) ustálila na požadované hodnotě. Řízení lze rozdělit na dvě skupiny a to na automatické a manuální. Automatické řízení využívá regulátory právě proto, aby řízení procesu nevyžadovalo nepřetržitou pozornost operátora s ručními zásahy.

V dnešní době jsou bezkonkurenčně nejpoužívanější regulátory v průmyslu se strukturou PID. Uvádí se, že až 90 % veškeré regulace v průmyslu je řešena právě zmíněným PID regulátorem. Systém, který regulátor řídí, se nazývá regulační soustava. Tuto soustavu, společně s proporcionálně-integračně-derivačním regulátorem, nazýváme regulační smyčkou. Regulační smyčka se vyskytuje ve dvou variantách a to buď v otevřené smyčce ORO, nebo v uzavřené smyčce URO.

Otevřenou smyčku regulačního obvodu lze také nazvat jako dopředné řízení, to znázorňuje obrázek 1.1. Nekontroluje se zde skutečný stav systému, proto se jedná o tzv. ovládání. Jedná se o nejzákladnější způsob řízení. Regulátor nemá žádné zpětné informace o stavu na výstupu, a tím nemůže nijak kompenzovat výchyly od požadované hodnoty. Nevýhody přímého řízení jsou kompenzace vlivu poruchy a neurčitosti modelu, dále pak fakt, že nedokáže stabilizovat nestabilní systém.



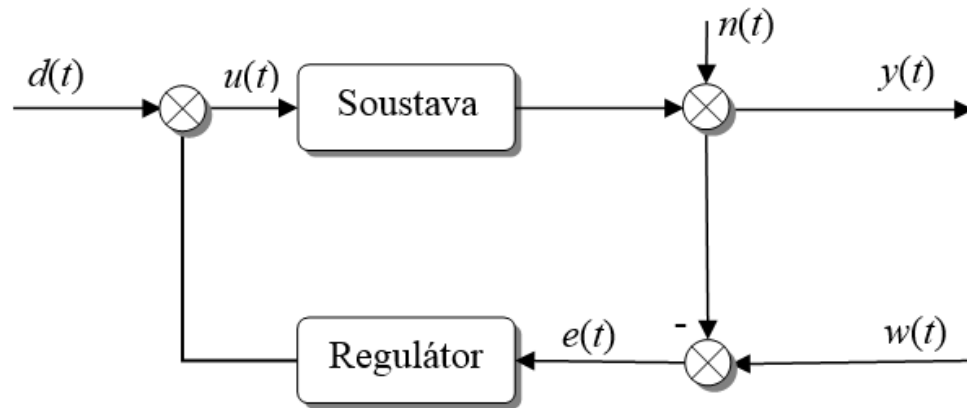
Obrázek 1.1 – Otevřený regulační obvod

Druhý a daleko častější případ je uzavřený regulační obvod, který využívá záporné zpětné vazby. Zpětná vazba má oproti přímému řízení řadu výhod, např. kompenzace vlivu poruchy, stabilizace systému a podobně. Během regulace se měří skutečná hodnota regulované veličiny $y(t)$, která se porovnává s požadovanou hodnotou $w(t)$. Tento rozdíl se nazývá regulační odchylka $e(t)$, která je přivedena na vstup regulátoru.

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

Regulační odchylka vzniká rozdílem skutečné regulované hodnoty $y(t)$ od požadované hodnoty $w(t)$ nebo působením poruchy $d(t)$ na regulační obvod. Podle velikosti regulační odchylky se nastaví regulační zásah nazývaný jako akční zásah $u(t)$, který zapůsobí na

regulovanou soustavu tak, aby se co nejvíce blížila požadované hodnotě $w(t)$. Cílem regulace je minimalizovat regulační odchylku $e(t)$, a tím docílit, aby regulovaná veličina $y(t)$ v každém okamžiku sledovala pokud možno co nejpřesněji požadovanou hodnotu $w(t)$, nezávisle na změnách dynamických vlastností řízené soustavy a působení nežádoucích vlivů a poruch $d(t)$ a $n(t)$. Uzavřenou regulační smyčku lze vidět na obrázku 1.2.



Obrázek 1.2 – Uzavřený regulační obvod

Podstatou využití regulátoru je přivést určitou fyzikální veličinu na hodnotu předem známou a na této hodnotě ji udržovat i za předpokladu působení náhlých poruchových veličin. Kdyby poruchové veličiny byly konstantní, nebylo by zapotřebí regulátorů a soustavu by stačilo uvést do žádaného stavu. Klíčové samozřejmě je, aby regulační obvod byl po zásahu regulátoru stabilní a nezvyšovala se jeho dynamika. Dynamické vlastnosti regulačního obvodu lze popsat pomocí diferenciálních rovnic. Pro práci s obyčejnými diferenciálními rovnicemi se využívá Laplaceova transformace, která umožňuje převést diferenciální rovnice n -tého řádu na algebraické rovnice n -tého stupně. Celý regulační obvod je pak charakterizován tzv. operátorovým přenosem, který je dán poměrem Laplaceova obrazu výstupu ku obrazu vstupu při nulových počátečních podmínkách.

Vlivem neustálého zlepšování techniky prošly regulátory řadou změn, od základních pneumatických regulátorů přes analogovou až dosavadní mikroprocesorovou technologii, kde neustálé zvyšování výpočetního výkonu umožňuje vylepšovat řízení a doplňovat pokročilé funkce. Jako je například bez rázové přepínání parametrů, filtrace vstupních a výstupních signálů, ošetření mezních stavů, samočinné nastavování parametrů či důmyslné diagnostiky. Princip regulátorů však zůstává v podstatě beze změn.

1.1 PID regulátor

Zkratka PID je složena ze tří složek – proportional-integral-derivative, které regulátor tvoří. Jedná se zpravidla o tři různé zásahy v reakci na regulační odchylku. Jednotlivé parametry regulátoru mají svůj význam a mohou se nastavovat v libovolném poměru tak, aby se docílilo požadavků na kvalitu regulace. Vstupem do regulátoru je regulační odchylka a výstupem je vážený součet právě zmiňovaných složek v podobě akčního zásahu.

1.1.1 Proporcionální složka

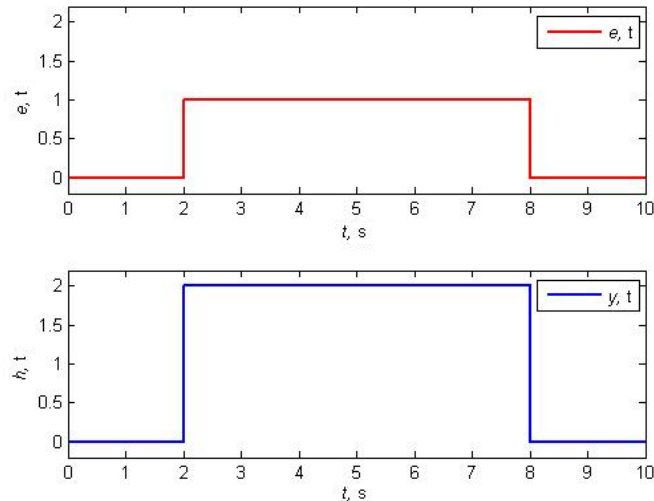
Proporcionální složka regulátoru v sobě zahrnuje násobení konstantou r_0 , která se nazývá proporcionální zesílení. Jedná se o zesilování regulační odchylky, neboli zesilování záporné zpětné vazby. Pokud bude regulátor obsahovat pouze P složku, regulační odchylka nebude nikdy vyregulovaná. Regulační odchylka se zvyšováním konstanty r_0 klesá, avšak nebude nikdy nulová. Proporcionální složku nelze libovolně zvyšovat, její zvyšování vede k nestabilitě regulačního obvodu, tj. do stavu, kdy regulovaná veličina kmitá nebo nekmitavě neomezeně narůstá. K odstranění trvalé regulační odchylky se do regulátoru přidává integrační složka, pokud sama regulovaná soustava nemá integrační charakter.

Akční veličina je vyjádřena vztahem:

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

Přenosová funkce je dána vztahem:

$$R(s) = r_0 \quad (1.3)$$



Obrázek 1.3 – Příklad přenosové funkce P složky

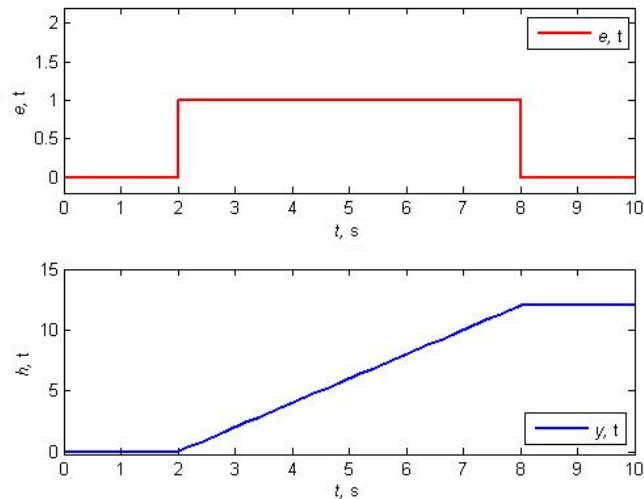
1.1.2 Integrovní složka

Integrovní složka r_{-1} regulátoru působí pouze tehdy, když není nulová regulační odchylka. Neboli regulátor působí akční veličinou na soustavu takovou dobu, dokud není regulační odchylka nulová. Zvětšováním podílu integrovní složky (zmenšování složky T_i), roste kmitavost regulačního pochodu. Nevýhodou samostatné integrovní složky je zvýšení řádu soustavy a prodloužení regulačního děje, proto se také přidává derivační složka, která regulační děj zrychluje. Akční veličina je vyjádřena vztahem:

$$u(t) = r_{-1} \cdot \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau \quad (1.4)$$

Přenosová funkce je dána vztahem:

$$R(s) = \frac{r_{-1}}{s} = \frac{1}{T_i s} \quad (1.5)$$



Obrázek 1.4 – Příklad přenosové funkce I složky

1.1.3 Derivační složka

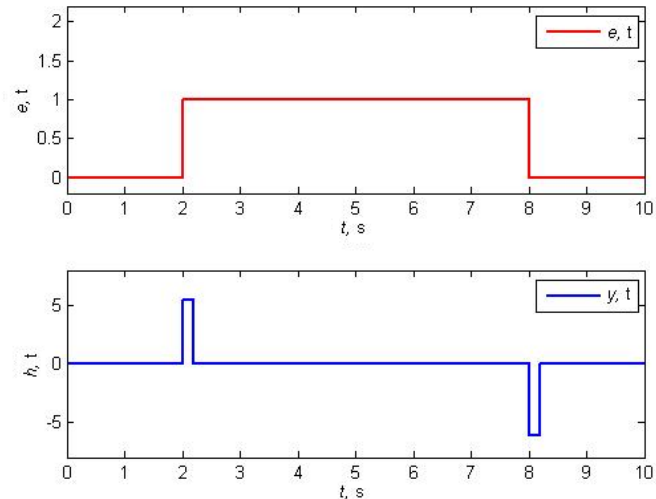
Derivační složku regulátoru r_1 lze vyjádřit jako rychlost změny regulační odchylky. V praxi se regulátor jen s derivační složkou nepoužívá, neboť reaguje pouze na změny regulační odchylky. D složka urychluje regulační pochod, zvláště u soustav vyšších řádů. Společně s I složkou umožňuje zpětné vazbě reagovat s určitým předstihem.

Akční veličina je vyjádřena tímto vztahem:

$$u(t) = r_1 \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (1.6)$$

Přenosová funkce je dána vztahem:

$$R(s) = r_1 \cdot s = T_d \cdot s \quad (1.7)$$

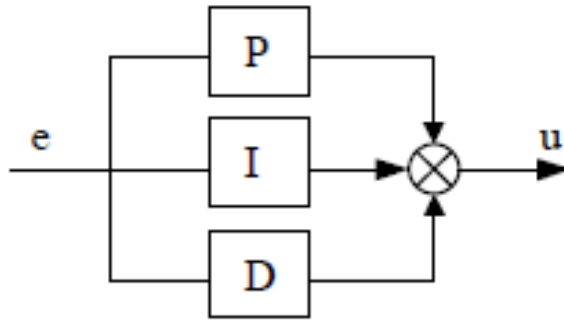


Obrázek 1.5 – Příklad přenosové funkce D složky

1.2 Tvary PID regulátoru

Realizace PID algoritmů je v různých regulátorech odlišná. Může se však rozdělit na tři základní kategorie – sériový tvar, paralelní tvar a ideální paralelní tvar s interakcí, označovaný také jako standartní tvar. Standartní tvar je v praxi využíván v cca 31 % průmyslových regulátorů, paralelní tvar má zastoupení v cca 22 %. Nejrozšířenějším je sériový tvar, který je využíván ve 47 % průmyslových aplikací. Důvod využití byl ve snazší realizovatelnosti, kde pro kompletní přenos stačil pouze jeden zesilující člen. Toho se především využívalo u pneumatických regulátorů, kde zesilovací člen byl rozměrný a drahý. Občas zazní názor, že regulátory popsané sériovým přenosem se nastavují experimentálně snáze než regulátory s paralelní strukturou. Důvod, proč je tento tvar rozšířený i v dnešní době, kdy u číslicových regulátorů se nejedná o úsporu nákladů, spočívá v konzervativitě výrobců, kteří se snaží dodržovat tradiční a v praxi zavedenou podobu PID regulátorů.

Paralelní regulátor může být zjednodušeně popsán vztahem 1.8. Ve skutečnosti však nejde derivační složku ideálně vytvořit a přidává se zpoždění prvního (někdy i vyššího) řádu. Parametry r_0 , r_{-1} , r_1 jsou stavitelné parametry regulátoru – proporcionální, integrační a derivační složky. Přenosová funkce všech tří parametrů je vidět na obrázku 1.7, kde zesílení r_0 způsobí zvýšení úrovně, derivační složka r_2 prudký pokles akční veličiny a integrační složka r_1 růst v čase.



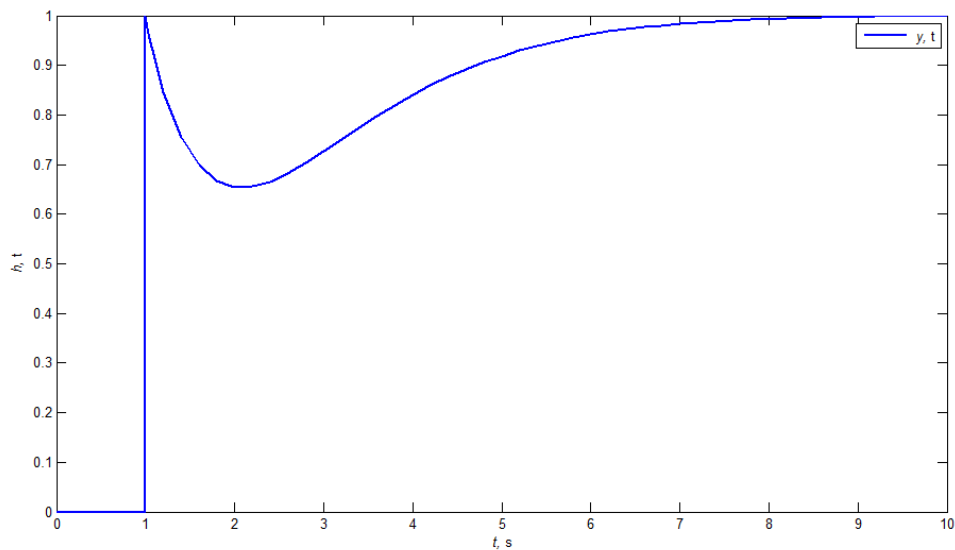
Obrázek 1.6 – Paralelní tvar PID regulátoru [SCHLEGEL, 2003]

Časová oblast:

$$u(t) = r_0 \cdot e(t) + r_{-1} \cdot \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau + r_1 \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (1.8)$$

Přenosová oblast:

$$U(s) = \left(r_0 + \frac{r_{-1}}{s} + r_1 \cdot s \right) \cdot E(s) \quad (1.9)$$



Obrázek 1.7 – Přenosová funkce PID regulátoru s aproximovanou derivací

Ideální tvar regulátoru je popsán vztahem 1.10.

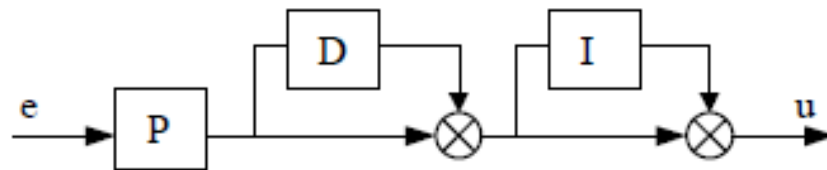
Časová oblast:

$$u(t) = r_0 \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1.10)$$

Přenosová oblast:

$$U(s) = r_{0s} \left[1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right] \cdot E(s) \quad (1.11)$$

Sériový tvar s interakcí je popsán vztahem 1.12 resp. 1.13. V tomto vztahu zastupují parametry T_i integrační časovou konstantu a T_d derivační časovou konstantu. Jedná se o interaktivní tvar regulátoru, jelikož všechny tři složky jsou na sobě závislé, změnou jedné složky se ovlivní složky ostatní.



Obrázek 1.8 – Sériový tvar PID regulátoru [SCHLEGEL, 2003]

Časová oblast:

$$u(t) = r_0^* \left[e(t) + \frac{1}{T_i^*} \cdot \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau \right] \cdot \left[1 + T_d^* \cdot \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1.12)$$

Přenosová oblast:

$$U(s) = r_0^* \left[1 + \frac{1}{T_i^* \cdot s} \right] \cdot [1 + T_d^* \cdot s] E(s) \quad (1.13)$$

Přepočet interaktivního regulátoru na neinteraktivní lze získat porovnáním obou tvarů rovnic regulátoru, kde dostaneme:

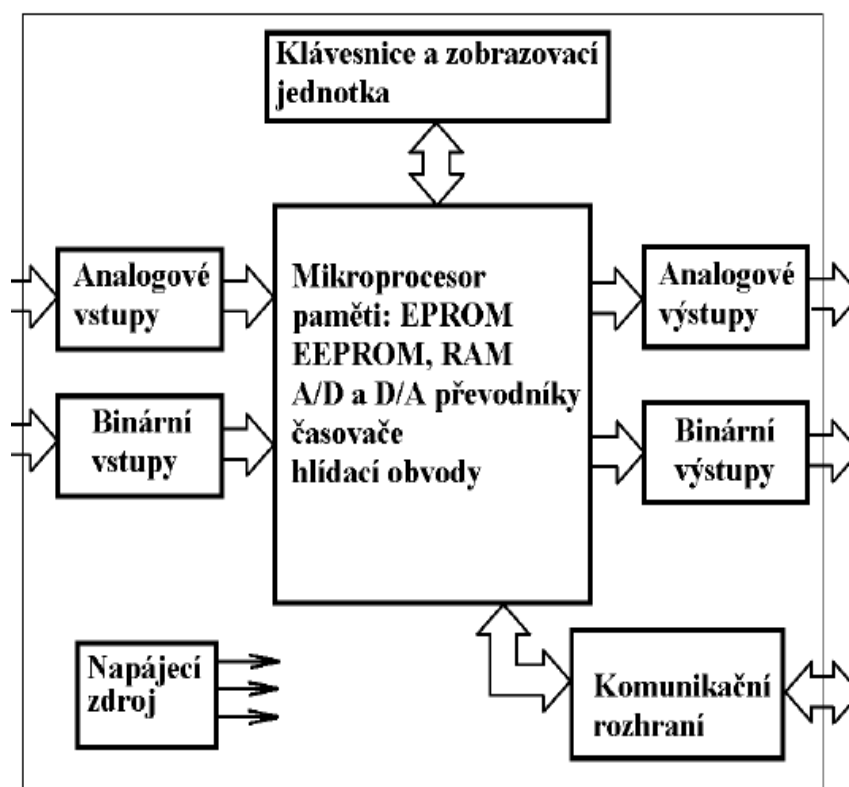
$$\begin{aligned}
 r_0 &= r_0^* \cdot \frac{T_i^* + T_d^*}{T_i^*} \\
 T_i &= T_i^* + T_d^* \\
 T_d &= \frac{T_i^* \cdot T_d^*}{T_i^* + T_d^*}
 \end{aligned} \tag{1.14}$$

Opačný přepočet není vždy možný, neboť interaktivní tvar neumožňuje libovolné kombinace hodnot T_i a T_d . Vzhledem k tomu, že sériový tvar byl a doposud je nejrozšířenější typ PID regulátoru, nebývají tyto kombinace příliš často zapotřebí. Přepočet lze převést pouze v případě, jestliže $T_i \geq 4T_d$.

$$\begin{aligned}
 r_0^* &= \frac{r_0}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4T_d}{T_i}} \right) \\
 T_i^* &= \frac{T_i}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4T_d}{T_i}} \right) \\
 T_d^* &= \frac{T_d}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4T_d}{T_i}} \right)
 \end{aligned} \tag{1.15}$$

2 Číslicový regulátor

V průmyslové praxi se stále zvyšovaly nároky na řízení rozsáhlých soustav, a to ukládat, zpracovávat a dálkově přenášet velká data bez zkreslení informace. V důsledku toho byly analogové řídicí systémy vytlačovány a nahrazovány číslicovými řídicími systémy. Diskrétní regulátory představují určitou aproximaci spojitých regulátorů s výjimkou popisu jejich chování. Spojité regulátory lze popsat pomocí diferenciálních rovnic, naproti tomu diskrétní regulátory pomocí diferenční rovnice. K Převodu mezi spojitou a diskrétní oblastí slouží Z-transformace. Konstrukce spojitých regulátorů, které byly tvořeny pomocí analogové elektroniky popř. pneumatických členů, je u číslicových regulátorů zcela odlišná. Číslicové regulátory jsou realizovány pomocí číslicových počítačů, nejčastěji se jedná o jednočipové počítače. Obecně vnitřní struktura číslicového regulátoru je popsána blokovým schématem na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1 – Blokové schéma číslicového regulátoru [Hlava, 2000]

Pomyslným srdcem celého regulátoru je jednočipový mikroprocesor. Další důležitou součástí jsou paměti ROM, EPROM na uložení programu a na uložení parametrů, které je třeba měnit EEPROM, popř. FLASH. Nesmí chybět operační paměť RAM, ta ovšem oproti předchozím pamětím neuchovává informaci při odpojení napájecího napětí. Aby byl schopen

číslicový regulátor komunikovat s procesy, které mají spojitou povahu, je zapotřebí převedení spojitého signálu do disktrétního tvaru. K tomuto účelu slouží na vstupu regulátoru A/D převodník. Ten vzorkuje spojitý signál a převádí ho na posloupnost disktrétních hodnot. Na výstupu regulátoru je zapotřebí číslicovou podobu akčního zásahu převést do spojitého tvaru pomocí D/A převodníku. Pro správnou funkci převodníku a číslicových algoritmů je nutné mít stabilní časovou základnu. V regulátoru k tomu slouží oscilátor, který je řízen přesným krystalem. Odtud se podle charakteru soustavy přepočítává vhodná perioda vzorkování T pro oba převodníky. Dále tu jsou různé hlídací obvody, které indikují překročení napájecího napětí, zacyklení či jiné nesprávné chování regulátoru. Obvykle jsou tyto funkce společně s paměťmi a převodníky integrovány na jednom mikročipu. Výhodou je jejich dostupnost a především cena.

Integrované A/D převodníky v číslicovém regulátoru pracují většinou s napět'ovými či proudovými signály snímačů. Výstupní signály se u jednotlivých snímačů liší jak typem signálu, tak i napět'ovou úrovní. Proto na vstupu číslicových regulátorů jsou integrovány přizpůsobovací obvody. Napět'ové signály jsou pro svoji velkou citlivost na rušení a přenos na delší vzdálenosti málo spolehlivé, z tohoto důvodu jsou nahrazovány proudovými signály, nejčastěji v unifikovaném rozsahu 4 – 20 mA. Výhodou je detekce přerušného vedení, klesne-li proud pod spodní úroveň signálu. Kromě napět'ových a proudových vstupů disponují číslicové regulátory i vstupy pro přímé připojení běžných čidel (např. termočlánky, odporové vysílače polohy nebo frekvenční vstupy pro vyhodnocení signálu z impulsních optoelektronických snímačů polohy a rychlosti). Nesmí chybět vstup pro binární signál, který umožňuje na dálku měnit režim provozu mezi automatickým a ručním.

Analogové výstupy z regulátoru bývají poněkud omezenější. Nejběžnější to jsou proudové signály v unifikovaném rozsahu 4 – 20 mA popř. 0 – 20 mA. Méně časté jsou napět'ové výstupy v rozsahu 0 – 5 V a 0 – 10 V. Dále regulátor obsahuje binární výstupy, které umožňují spínat menší zátěže, nebo pomocí výkonových můstků ovládat servomotory.

Důležitou součástí regulátoru je komunikace s okolím. Lze ji rozdělit na komunikaci omezenou, kde je k dispozici pouze konektor pro připojení rozhraní TIA/EIA. Jedná se pouze o spojení s jinými zařízeními popř. programovým vybavením téhož výrobce. V druhé variantě regulátor umožňuje připojení do standardizované průmyslové sběrnice např. Profibus.

Z konstrukčního provedení lze dělit regulátory na dvě skupiny – kompaktní a modulární. Jak již z názvu vyplývá, kompaktní regulátor je kompletní přístroj, kde v jednom pouzdře obsahuje mikropočítač, vstupy a výstupy s přizpůsobovacími obvody, zobrazovací jednotku, klávesnici a komunikační rozhraní. Výrobci nabízejí několik variant v různých

provedení vstupů, výstupů, komunikačních rozhraní apod. Další možnosti uživatelsky změnit konfiguraci jsou omezeny. Možnost libovolně měnit konfiguraci nabízí druhá skupina modulárních regulátorů. Zde o počtu vstupů a výstupů rozhoduje uživatel, který podle potřeby přidává moduly a tím může konfiguraci regulátoru v širokém rozsahu měnit.

Dalším významným kritériem, podle kterého se dají regulátory dělit, je možnost ovlivnění regulátoru na programové úrovni a to buď na omezeně programovatelné, nebo volně programovatelné. U omezeně programovatelných regulátorů lze pouze volit mezi několika typy regulačních algoritmů. Oproti tomu volně programovatelné regulátory umožňují uživateli podstatně větší flexibilitu, kdy pomocí připravených funkčních bloků s časovými a logickými operacemi vytváří poměrně složité regulační struktury.

2.1 Diskretizace PID regulátoru

Číslicové regulátory PSD (Proporcionálně-Sumačně-Diferenční) jsou diskrétní analogií spojitých PID regulátorů. Jedná se o náhradu integrálu sumací a derivační složky pomocí diferencí. Z toho vyplývá, že PSD regulátory se svým chováním pouze přibližují spojitým PID regulátorům. Zmenšováním periody vzorkování na výstupu se mohou PSD regulátory blížit analogovému výstupu, ovšem vzniká problém parazitního šumu, který se řeší vhodnou filtrací, popř. vhodným numerickým zpracováním signálu.

Jak již bylo řečeno, v PSD regulátoru se používají diskrétní náhrady spojitých algoritmů integrace a derivace. Od zvoleného nahrazení je odvozen výsledný Z-obraz ekvivalentního PSD regulátoru. Jestliže se vychází z ideálního tvaru spojitého PID regulátoru, jež je popsán integro-diferenciální rovnicí 1.10, pak ekvivalentní PSD regulátor je definován v diskrétních časových okamžicích $t = kT$, $k = 0, 1, 2, \dots$ následující rovnicí

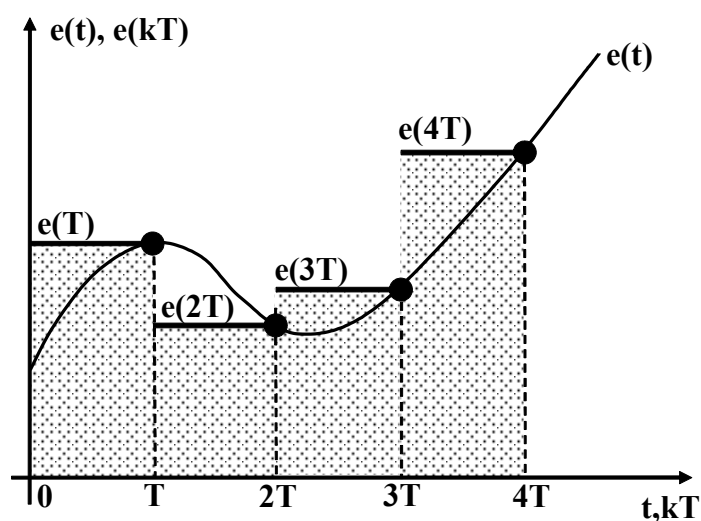
$$u(kT) = r_0 \left[e(kT) + \frac{1}{T_i} \cdot I(kT) + T_d \cdot D(kT) \right] \quad (2.1)$$

Kde $I(kT)$ je náhrada integrálu v diskrétním časovém okamžiku a $D(kT)$ je náhrada hodnoty derivace v diskrétním časovém okamžiku. Pro náhradu integrace se nejčastěji volí tři typy diskrétní náhrady:

- a) zpětná obdélníková náhrada (ZOBD)

$$I(kT) = \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau \approx T \sum_{i=1}^k e(iT) \quad (2.2)$$

Hodnota integrálu se nahrazuje součtem ploch obdélníků nahrazujícím plochu pod původní spojitou křivkou $e(t)$, viz obr. 2.2. Perioda vzorkování určuje šířku obdélníků. Výšku i -tého obdélníku určuje aktuální hodnota vzorku $e(iT)$ v čase $t = iT$, kde $i = 1, \dots, k$.

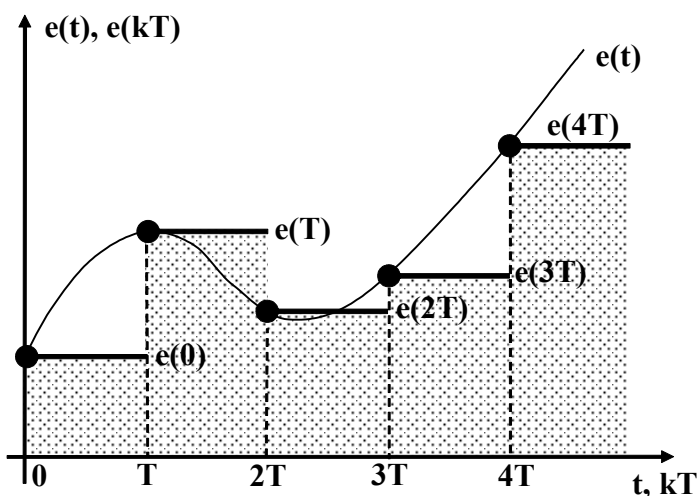


Obrázek 2.2 – Zpětná obdélníková náhrada [HYNIOVÁ, 2011]

b) dopředná obdélníková náhrada (DOBD)

$$I(kT) = \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau \approx T \sum_{i=1}^{k-1} e(iT) \quad (2.3)$$

Hodnota integrálu se nahrazuje součtem ploch obdélníků nahrazujícím plochu pod původní spojitou křivkou $e(t)$ na obr. 2.3. Výška i -tého obdélníku je dána hodnotou vzorku $e[(i-1)T]$ v čase $t = (i-1)T$,

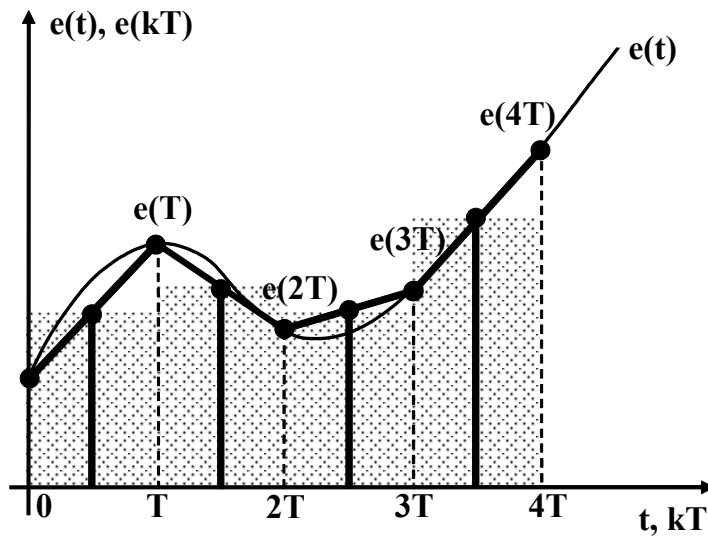


Obrázek 2.3 – Dopředná obdélníková náhrada [HYNIOVÁ, 2011]

c) lichoběžníková náhrada

$$I(kT) = \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau \approx T \sum_{i=1}^k \frac{e(iT) + e[(i-1)T]}{2} \quad (2.4)$$

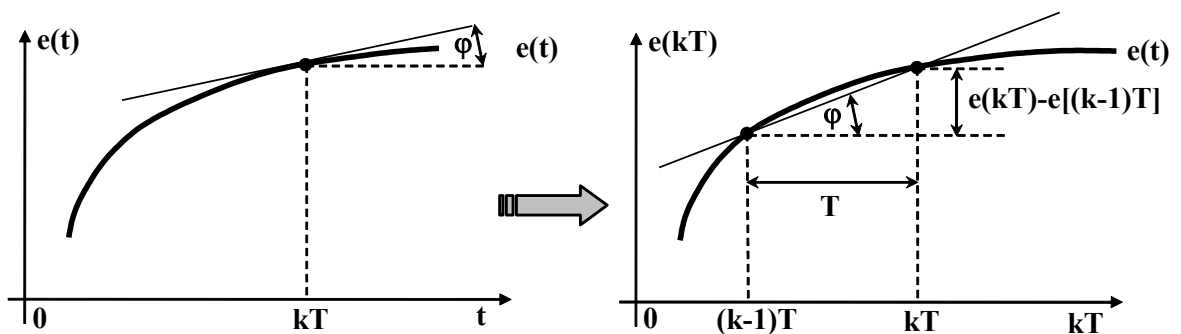
Hodnota integrálu se nahrazuje součtem ploch lichoběžníků nahrazujícím plochu pod původní spojitou křivkou $e(t)$. Jedná se o přesnější aproximaci spojitě křivky $e(t)$.



Obrázek 2.4 – Lichoběžníková náhrada [HYNIOVÁ, 2011]

Derivační složka je v nejjednodušším případě aproximovaná v časovém okamžiku $t=kT$ pomocí zpětné diference 1. řádu.

$$D(kT) = \frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T} \quad (2.5)$$



Obrázek 2.5 – Zpětná diference [HYNIOVÁ, 2011]

2.2 Tvary PSD regulátoru

Dosadí-li se do vztahu 2.1 za integrál zpětná obdélníková náhrada a za derivaci zpětná diference, dostane se vztah pro akční člen:

$$u(kT) = r_0 \left[e(kT) + \frac{T}{T_i} \cdot \sum_{i=1}^k e(iT) + \frac{T_d}{T} \cdot \{e(kT) - e[(k-1)T]\} \right] + u_0 \quad (2.6)$$

Tento vztah se nazývá polohový algoritmus PSD regulátoru definující hodnotu akční veličiny v okamžiku kT . Ze vztahu je patrné, že ve vzorkovacím okamžiku kT vypočítává PSD algoritmus aktuální hodnotu akční veličiny z aktuálních a minulých hodnot regulační odchylky $e(iT)$. Při nulových počátečních podmínkách se snadno určí Z-přenos polohového PSD regulátoru

$$G_R(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = r_0 \left[1 + \frac{T}{T_i} \cdot \frac{z}{z-1} + \frac{T_d}{T} \cdot \frac{z-1}{z} \right] \quad (2.7)$$

Nevýhodou takovéhoho řídicího algoritmu je, že nemá rekurentní charakter, tzn., že k výpočtu aktuální hodnoty akční veličiny je nutné uchovávat celou historii regulační odchylky $e(iT)$, což vyžaduje vysoké nároky na paměť.

Z toho důvodu se začal používat tzv. přírůstkový tvar PSD regulátoru, někdy také nazývaný rychlostní, nebo inkrementální. V k -tém kroku se pak neurčuje okamžitá hodnota akční veličiny, ale pouze její přírůstek $\Delta u(kT)$ vůči hodnotě v předchozím časovém okamžiku $y[(k-1)T]$. Vypočítávají se pouze změny akční veličiny $u(kT)$. Aktuální hodnota akční veličiny je dána vztahem:

$$u(kT) = r_0 \left[e(kT) + \frac{T}{T_i} \cdot \sum_{i=1}^k e(iT) + \frac{T_d}{T} \cdot e(kT) - e[(k-1)T] \right] + u_0 \quad (2.8)$$

Předchozí hodnota akční veličiny je vyjádřena vztahem:

$$u[(k-1)T] = r_0 \left[e[(k-1)T] + \frac{T}{T_i} \cdot \sum_{i=1}^{k-1} e(iT) + \frac{T_d}{T} \cdot \{e[(k-1)T] - e[(k-2)T]\} \right] \quad (2.9)$$

Přírůstek akční veličiny $\nabla u(kT)$ je roven:

$$\begin{aligned}
 \nabla u(kT) &= u(kT) - u[(k-1)T] \\
 &= r_0 \left[\{e(kT) - e[(k-1)T]\} + \frac{T}{T_i} \cdot \left\{ \sum_{i=1}^k e(iT) - \sum_{i=1}^{k-1} e(iT) \right\} + \frac{T_d}{T} \right. \\
 &\quad \left. \cdot \{e(kT) - 2e[(k-1)T] + e[(k-2)T]\} \right] \\
 &= r_0 \left[\{e(kT) - e[(k-1)T]\} + \frac{T}{T_i} \cdot e(kT) + \frac{T_d}{T} \right. \\
 &\quad \left. \cdot \{e(kT) - 2e[(k-1)T] + e[(k-2)T]\} \right] \\
 &= q_0 e(kT) + q_1 e[(k-1)T] + q_2 e[(k-2)T]
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

kde

$$\begin{aligned}
 q_0 &= r_0 \left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right); \\
 q_1 &= -r_0 \left(1 + \frac{2T_d}{T} \right); \\
 q_2 &= r_0 \frac{T_d}{T}
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Hodnotu akční veličiny v aktuálním časovém okamžiku kT lze vyjádřit v rekurentním tvaru jako:

$$u(kT) = q_0 e(kT) + q_1 e[(k-1)T] + q_2 e[(k-2)T] + u[(k-1)T] \tag{2.12}$$

Z tvaru 2.12 vyplývá, že v přírůstkovém tvaru PSD regulátoru generuje hodnotu akční veličiny $u(kT)$ v k -tém okamžiku na základě minulé hodnoty akční veličiny $u[(k-1)T]$ a na základě aktuální, minulé a předminulé hodnoty regulační odchylky. Nezáleží zde na zvoleném způsobu náhrady integrálu spojitého PID regulátoru. Přenos rekurentního přírůstkového tvaru PSD regulátoru je dán vztahem:

$$G_R(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} \tag{2.13}$$

Tabulka 2.1 – Přepočítání parametrů r_0, T_i, T_d spojitěho regulátoru na parametry q_0, q_1, q_2 přírůstkového regulátoru [BOBÁL, 2005]

| | q_0 | q_1 | q_2 |
|------------------------------|---|--|---------------------|
| Zpětná obdélníková náhrada | $r_0 \left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right)$ | $-r_0 \left(1 + 2 \frac{T_d}{T} \right)$ | $r_0 \frac{T_d}{T}$ |
| Dopředná obdélníková náhrada | $r_0 \left(1 + \frac{T_d}{T} \right)$ | $-r_0 \left(1 + 2 \frac{T_d}{T} - \frac{T}{T_i} \right)$ | $r_0 \frac{T_d}{T}$ |
| Lichoběžníková náhrada | $r_0 \left(1 + \frac{T}{2T_i} + \frac{T_d}{T} \right)$ | $-r_0 \left(1 + 2 \frac{T_d}{T} - \frac{T}{2T_i} \right)$ | $r_0 \frac{T_d}{T}$ |

3 Průmyslové regulátory

Jak již bylo řečeno v předcházející kapitole, průmyslové regulátory můžeme dělit do dvou hlavních skupin, a to podle konstrukčního hlediska, na kaskádní a modulární. Průmyslové regulátory lze rozlišovat podle typu montáže. Většina regulátorů je zapouzdřena a montují se na standardní DIN lišty. Dále lze rozlišovat jednotlivé regulátory podle počtu a především typu (proudových, napěťových a binárních) vstupů a výstupů. Neměly by chybět vstupy pro připojení běžných čidel, např. termočlánků. Pro vzdálenou správu, včetně nahrání a ladění projektů, by měl být regulátor také vybaven vhodnými komunikačními možnostmi. Nesmí chybět sběrnice pro komunikaci mezi periferními jednotkami. Poslední nároky jsou kladeny na snadné programování, nejběžněji graficky orientovaného vývojového prostředí.

Společnost PMA (Prozeß und Maschinen Automation) byla založena roku 1929 původně jako část firmy Withof a později firmy Philips Industrial Electronic Corporation. V roce 2005 se stala součástí firmy Danaher Corporation. PMA se specializuje na vysoce kvalitní číslicové regulátory pro průmyslovou aplikaci. PMA zařízení nabízejí rozsáhlé doplňkové funkce a pokročilé konfigurační nástroje. Kromě toho PMA nabízí systémové komponenty, které spravují a samostatně řídí úkoly v síti automatizačních systémů.

3.1 Regulátor KS 90-1

Regulátor KS 90-1 na obrázku 3.1 je určen k řízení tepelných procesů. Je konstruován jako modulární regulátor, který umožňuje výměnu nebo doplnění o zásuvné moduly bez jakéhokoli nářadí. Nabízí univerzální řízení, jak pro spojitou, tak i spínací regulaci. Čas cyklu 100 ms umožňuje řízení rychlých regulačních obvodů. Bezpečnost je zajištěna číselným heslem či vzdáleným spínačem. Komunikace probíhá pomocí RS422/485 nebo PROFIBUS DP. Speciální rozsahy univerzálních vstupů s volitelnou linearizací umožňují připojení všech druhů průmyslových čidel. Čtyři procesní výstupy nabízí připojení výkonových spínačů, proudových, tak i napěťových. Díky dvou variantám auto-tuningu (při startu a na žádané hodnotě) umožňuje regulátor stanovit optimální regulační parametry pro rychlé vyrovnání bez překmitu. Na předním panelu se nachází pět ovládacích prvků společně s podsvíceným displejem. V horní části panelu jsou čtyři diody, kterými lze libovolně signalizovat např. překročení uživatelem definovaných mezí. Pomocí předního komunikačního portu „BluePort“ lze regulátor snadno propojit s PC.

Firma poskytuje prostředí BlueControl, které umožňuje obsluhu rychlé a jednoduché nastavení regulátoru pro danou regulační úlohu. Prostředí dále disponuje simulací

a diagnostikou, včetně zobrazení on-line trendů. Provozní teploty se pohybují od -20 °C po +65 °C. To umožňuje umístit regulátor blíže k regulovaným soustavám.



Obrázek 3.1 – Regulátor KS 90-1 [PMA, 2012]

Tabulka 3.1 – Základní parametry regulátoru KS 90-1

| | |
|---------------------|---|
| Určení | řízení teploty |
| Vstupy | termočlánky, I , U signály, detekce poruchy |
| Výstupy | reléové, I , U |
| Rozlišení vstupů | 14 bitů |
| Rozlišení výstupů | 11 bitů |
| Čas cyklu | 100, ms |
| Komunikace | Profibus DP, RS422/485, RS232 |
| Spojité regulátor | ano |
| Nespojitý regulátor | ano |
| Autotuning | při startu a na žádané hodnotě |

3.2 Regulátor KS 98-1

Regulátor KS 98-1 je určen pro řízení technologických procesů. Je konstruován jako modulární systém, lze tedy pomocí zásuvných modulů přizpůsobit regulátor pro požadované aplikace. Uživatel může provést výměnu nebo instalaci modulů bez jakékoli kalibrace. Nabízí dvoubarevný grafický displej, který slouží k upozornění obsluhy při prvním kontaktu s regulátorem. Umožňuje měnit individuální nastavení menu přístroje s blokování nežádoucích operací v menu regulátoru. Přínosem je zobrazování trendů na displeji s funkcí

lupy, popřípadě pomocných textů. Regulátor nabízí pokročilý algoritmus samočinného nastavení pro obtížně regulovatelné procesy s dominantním dopravním zpožděním. Na vstup regulátoru je možno připojit všechny typy běžných průmyslových čidel. Regulátor disponuje jednou komunikační linkou RS232 pro připojení PC se softwarem a jednou průmyslovou linkou na zadní svorkovnici. Inženýrský software EK/KS98 je koncipován jako grafický editor funkčních bloků pro přehlednější programování regulátoru. Firma PMA dále nabízí simulační program Sim/KS98, který slouží k testování a odladění vytvořené struktury ještě před nasazením do technologie. Simulátor obsahuje i model regulované soustavy, takže obsluha může ověřit chování uzavřené regulační smyčky. Přední panel obsahuje pětici ovládacích tlačítek spolu s diodami indikujícími např. alarmy. Provozní teploty se pohybují od -20 °C po +65 °C.



Obrázek 3.2 – Regulátor KS 98-1 [PMA, 2012]

Tabulka 3.2 – Základní parametry regulátoru KS 98-1

| | |
|---------------------|--|
| Určení | řízení teploty |
| Vstupy | termočlánky, I , U signály, detekce poruchy |
| Výstupy | reléové, I , U |
| Rozlišení vstupů | 14 bitů |
| Rozlišení výstupů | 12 bitů |
| Čas cyklu | 100 ms |
| Komunikace | Profibus DP, InterBus, Canopen, RS422/485, RS232 |
| Spojité regulátor | ano |
| Nespojitý regulátor | ano |
| Autotuning | pokročilý algoritmus PMATune |

4 Auto-tuning

PID regulátory v jistém ohledu představují výjimku, jelikož jejich struktura nevyplývala z teoretických úvah, ale postupně se vyvinula z praxe v průběhu dvacátých a třicátých let dvacátého století. Technici firem Taylor a Foxboro vytvářeli pneumatický regulační přístroj (koncept PID regulátoru) k řízení procesů především proto, aby vyhovoval jistému okruhu aplikací. Tomuto pokusnému vývoji samotného zařízení odpovídaly i metody jeho nastavení, které z počátku byly výhradně experimentální záležitostí. Proto průlomovou věcí byl roku 1942 souhrn nastavujících pravidel od inženýrů John G. Ziegler a Nathaniel B. Nichols.

Do dnešní doby byla vypracována řada postupů a optimalizačních metod, které se v praxi velmi úspěšně využívají a uživatelé i dodavatelé regulační techniky s ní mají rozsáhlé zkušenosti. Příchodem číslicových regulátorů vznikla myšlenka tyto metody automatizovat. V dnešní době je optimalizační metodou vybavena téměř většina číslicových regulátorů. Každý výrobce aplikuje do průmyslového regulátoru svůj algoritmus pro samočinné nastavení parametrů regulátoru. V literatuře termín samočinného nastavení parametrů je označován jako self-tuning popř. autotuning. Jedná se o proces, který provede jednorázové nastavení regulátoru při uvedení do provozu eventuálně na povel operátora. Na rozdíl od jednorázového nastavení může být regulátor nastavován také průběžně za provozu, kde své chování přizpůsobí změnám vlastností regulované soustavy. Toto řízení nazýváme adaptivní, kde identifikace probíhá průběžně.

Adaptivní regulátory jsou teoreticky i implicitně náročnější a vyžadují hlubší znalosti automatického řízení k porozumění jejich algoritmů a z tohoto důvodu se v praxi moc nevyužívají. Hranice mezi oběma typy řízení není striktní, neboť u některých metod záleží na volbě, zda použijeme jednorázové nebo průběžné adaptivní řízení. Obecně metody samočinného nastavování parametrů regulátoru je možné třídit na zpětnovazební řízení nebo ovládání bez zpětné vazby. Tyto metody jsou založeny na jednoduchém experimentu sestávajícím z následujících kroků:

- regulátor generuje poruchu směrem k procesu,
- regulátor měří odezvu a následně ji vyhodnotí,
- regulátor vypočte parametry regulátoru.

„Nastavení je založeno na identifikačním experimentu provedeném se samotnou regulovanou soustavou. Při nastavování v uzavřené smyčce je naopak regulační funkce

v nějaké míře zachována a identifikace vychází buď z odezev na úmyslné změny žádané hodnoty nebo bez jakéhokoliv narušení regulačního pochodu pouze z jejich odezev na poruchové veličiny a změny žádané hodnoty, k nimž dochází během obvyklého provozu. Nastavení v otevřené smyčce je nejčastěji založeno na vyhodnocení přechodové charakteristiky regulované soustavy. Tento v principu asi nejjednodušší přístup je implementován v mnoha průmyslových regulátorech. Od uživatele vyžaduje, aby regulovanou soustavu nejprve v ručním režimu nechal ustálit na hodnotě regulované veličiny odpovídající předpokládanému pracovnímu bodu. Následující skok akční veličiny musí být dostatečně malý, aby se příliš neprojevil nelinearity soustavy, zároveň však ne tak malý, aby přechodová charakteristika byla znehodnocena a její vyhodnocení ztíženo v důsledku šumu a dalších rušivých vlivů. U některých regulátorů velikost skoku nastavuje uživatel (obvykle v procentech rozsahu akční veličiny). U jiných je určena automaticky na základě změřené úrovně šumu. Přechodová charakteristika je následně vyhodnocena. Výsledkem mohou být jednoduché kvantitativní údaje typu doby průtahu a náběhu či nejrůznější typy modelů. Na základě tohoto vyhodnocení jsou pak v dalším kroku navrženy parametry regulátoru. Z průběhu přechodové charakteristiky lze také přibližně určit vhodnou vzorkovací periodu regulátoru.“ [Hlava, 2000]

Tento postup použije operátor regulátoru, pokud bude chtít regulátor nastavit ručně. Poruchu může mít různou podobu, např. skokového impulsu, periodických skoků nebo harmonického signálu. Po vyhodnocení odezvy na poruchu jsou známy dva typy znalostí procesů a to ve formě modelu (model-based) nebo jednoduchého „povahopisu“ (rule-based, model-free).

Ne vždy při špatné regulaci má vliv nesprávně nastavený regulátor. Obsluha by měla před spuštěním autotuningu zkontrolovat, zda senzory a akční členy pracují správně. Zkušeného operátora, který zkontroluje např. tření v akčním členu, nenahradí žádný algoritmus pro nastavení PID regulátoru.

5 Metody samočinného nastavování regulátorů

Při spuštění funkce autotuning regulátor zaznamená odezvu procesu na uměle vybuzenou poruchu. Tím získá základní informace o procesu. U matematického modelu procesu zaznamenává přechodovou charakteristiku procesu, přičemž nezáleží, zda se jedná o uzavřený nebo otevřený regulační obvod. Předpokladem zůstává podmínka stabilního procesu. Při znalosti ustálených hodnot regulované a akční veličiny před a po vybuzení poruchou, lze určit jeden ze tří parametrů. Další dva lze určit z přechodové charakteristiky, jedná se o statické zesílení, dopravní zpoždění a globální časovou konstantu. Při znalosti těchto tří parametrů existuje řada postupů k výpočtu parametrů PID regulátoru.

Druhý způsob výpočtu parametrů PID regulátoru je založený na frekvenčních metodách. Proces je buzen harmonickým signálem a zaznamenává se odezva procesu. Velmi úspěšně se zde využívá relé ve zpětné vazbě, které způsobí na výstupu soustavy trvalou oscilaci, ze které je možné určit kritickou periodu a kritické zesílení. Na základě těchto dvou hodnot lze pomocí Ziegler-Nicholsových vztahů určit parametry PID regulátoru.

Druhou kategorií jsou metody používající průběžných odhadů parametrů lineárních prediktorů tzv. rekurzivní identifikace. Algoritmus je založený na metodě nejmenších čtverců. Výhodou této metody je, že není nutné proces budit umělou poruchou.

Třetí kategorie samočinně nastavujících se metod není založena na matematickém modelu, jak tomu bylo doposud. Zde se využívá určitých pravidel, které se velmi blízce podobají uvažování zkušeného operátora. Pomocí přechodové odezvy na změnu žádané hodnoty se určí např. doba ustálení a velikost přeregulování. Podle požadavků na regulovanou veličinu se upravují parametry PID regulátoru. Vše se porovnává pomocí kvantitativních ukazatelů, které přechodovou odezvu charakterizují.

5.1 Metoda optimálního modulu

Jedná se o metodu, kde regulátor generuje skok akční veličiny a zaznamená přechodovou charakteristiku, která je následně aproximována přenosem:

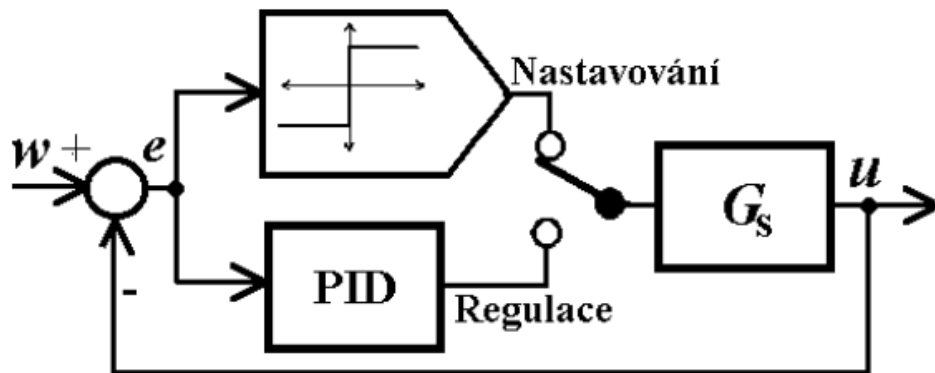
$$G_M(s) = \frac{K}{(\tau_M s + 1)^n} \quad (5.1)$$

Na základě tohoto modelu jsou navrženy parametry PID regulátoru pomocí metody optimálního modulu. Jedná se o metodu, která může přímo pracovat i s přenosem, který obsahuje dopravní zpoždění, díky tomu nejsou nutné aproximace systémy vysokého řádu

(nejvýše osmého řádu). Tato metoda vykazuje v odezvě na žádanou hodnotu jistý překmit. Pokud budou požadavky na řízení bez překmitu, regulátor sníží zesílení na 80 %. Tuto metodu využívá firma Siemens u regulátoru SIPART.

5.2 Metoda limitního cyklu

Jedná se o metodu vycházející z kritického zesílení a kritické periody. Samočinné nastavovací algoritmy využívají dvoupolohové reléové nelinearity zapojené ve zpětné vazbě znázorněné na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1 – Princip samočinně se nastavujícího regulátoru pomocí reléové zpětné vazby [Hlava, 2000]

V nastavovacím režimu je odpojen regulátor a regulovaná veličina na výstupu soustavy bude kmitat kolem žádané hodnoty. Využívají se skutečnosti, že regulované soustavy se chovají z hlediska frekvenčních vlastností jako dolní propust. Tím regulovaná soustava signály vyšších frekvencí potlačuje a také amplitudy vyšších harmonických jsou nepatrné oproti základním frekvencím. Díky tomu se vyšší harmonické signály mohou zanedbat a považovat průběhy regulační odchylky i regulované veličiny za harmonické. Obvod bude kmitat na tzv. kritické frekvenci, přenos regulované soustavy bude reálný a záporný. Tato frekvence se změří pomocí jednoduchého algoritmu, který detekuje průchod signálu regulační odchylky nulou. Kritické zesílení lze spočítat podle vztahu:

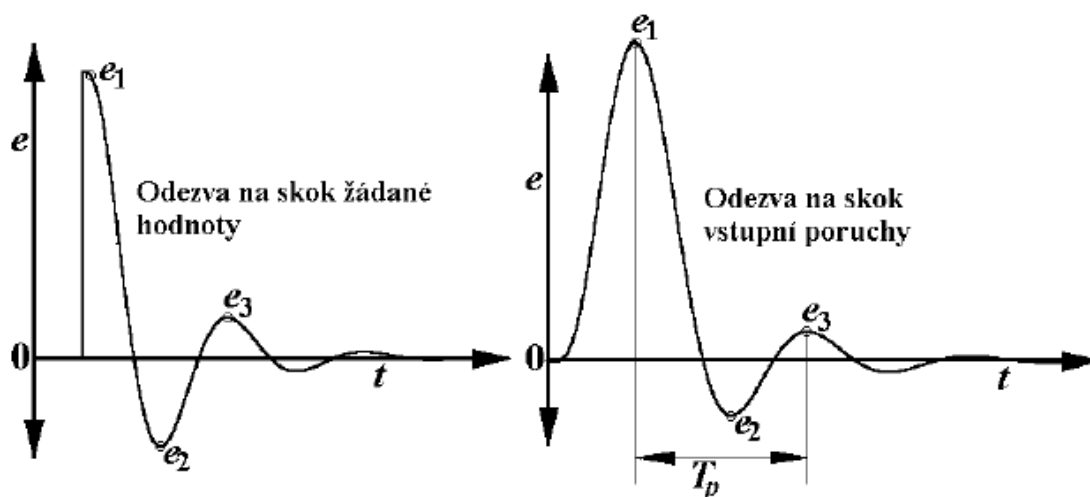
$$r_k = \frac{4M}{\pi A} \quad (5.2)$$

kde M amplituda na výstupu reléové nelinearity,
 π Ludolfovo číslo,
 A amplituda vstupního signálu.

Aby mohlo samočinné nastavení spolehlivě určit parametry regulátoru, je nutné soustavu přivést do zvoleného rovnovážného stavu, kde je předpokládán pracovní rozsah soustavy. Výsledkem takto provedené identifikace je dvojice kritických hodnot, kritická perioda a kritické zesílení. Je třeba zdůraznit, že zanedbané vyšší harmonické signály představují chybu v řádu jednotek procent. Pokud tuto chybu nelze u některých typů systémů považovat za přijatelnou, řešením bývá náhrada reléové nelinearity nelineárními členy. Ty vykazují rychlejší pokles amplitudy na výstupním signálu. S touto metodou přišla v 80. letech švédská firma Satt Control Instruments. Dnes je běžně využívaná v regulátorech ABB, PMA, Siemens atd., kde je rozšířená o měření statického zesílení, popřípadě umožňuje vylepšit regulaci o adaptivní dopřednou vazbu.

5.3 Metoda EXACT

Algoritmy metody EXACT (Expert Adaptive Controller Tuning) sledují tvary průběhů odezvy systému na změny žádané hodnoty a poruchových veličin, ze kterých se snaží navrhnout optimální parametry regulátoru. Typické odezvy na změnu žádané hodnoty a poruchové veličiny v uzavřeném regulačním obvodu jsou naznačeny na obrázku 5.2.



Obrázek 5.2 – Odezvy na skokové změny žádané hodnoty a poruchové veličiny [Hlava, 2000]

Algoritmus detekuje okamžik, kdy se regulační odchylka odchýlí od nulové hodnoty o více než dvojnásobek hladiny šumu. Takto je detekována trojice vrcholů regulační odchylky, ze kterých lze vypočítat periodu kmitů T_p , tlumení d a překmit z .

$$d = \left| \frac{(e_3 - e_2)}{(e_1 - e_2)} \right|, \quad d \in \langle 0,1 ; 1 \rangle \quad (5.3)$$

$$z = \left| \frac{(e_2)}{(e_1)} \right|, \quad z \in \langle 0 ; 1 \rangle \quad (5.4)$$

Uživatel nastavuje maximální hodnoty tlumení a překmitu, čímž ovlivňuje průběhy regulačních pochodů. Doporučené hodnoty jsou $d_{max} = 0,5$ a $z_{max} = 0,3$. Algoritmus s ohledem na vzájemnou závislost obou parametrů začne nastavovat parametry regulátoru tak, aby se co nejvíce blížily zadaným maximům. Zároveň k periodě T_p nastavuje vhodné časové konstanty PID regulátoru. Na počátku nastavování regulátoru je zapotřebí předběžná znalost chování soustavy, která zabezpečí stabilní regulační pochod. Z tohoto důvodu je samotnému algoritmu samočinného nastavení předřazena přednastavovací fáze, tzv. Pre-Tuning, která pomocí přechodové odezvy regulované soustavy vyhodnotí a nalezne předběžné nastavení regulátoru. Čímž zajistí na počátku metody EXACT stabilitu regulačního obvodu. Implementaci této metody lze nalézt u regulátorů firmy Foxboro.

5.4 Metoda vycházející z přechodové charakteristiky

Tato metoda se řídí heslem plug & control, představa je taková, že po připojení regulátoru do soustavy se při najíždění na žádanou hodnotu identifikuje soustava a posléze se nastaví parametry regulátoru. Základ algoritmu vychází z modifikovaného postupu vycházejícího z konstrukce směrnice tečny v inflexním bodě přechodové charakteristiky. K omezení citlivosti na šum signál prochází filtrem prvního řádu, jehož časová konstanta je odvozena z integrační nebo derivační časové konstanty.

Identifikaci soustavy lze rozdělit do několika kroků. Před samotným najížděním na požadovanou hodnotu se zaznamená výchozí hodnota regulované veličiny y_0 na výstupu soustavy a její odpovídající velikost akční veličiny u_0 a požadavek příchodu t_0 . Poté přijde skok akční veličiny u_k a sleduje se odezva soustavy. Pokud algoritmus v regulátoru zjistí po dvou po sobě jdoucích okamžicích vzorkování zpomalování nárůstu regulované veličiny y , interpretuje to jako nalezení inflexního bodu. Zaznamená čas t_i a hodnotu na výstupu soustavy y_i , kdy soustava dosáhla inflexního bodu. Následně vypočte směrnici tečny v inflexním bodě k a z těchto údajů vypočte dobu průtahu podle následujícího vzorce

$$T_u = \frac{t_i - t_0 - (\vartheta_i - \vartheta_0)}{k} \quad (5.5)$$

kde $k = \frac{d\vartheta}{dt}, \quad t = t_i$ (5.6)

Znalost směrnice tečny v inflexním bodě a doby průtahu umožní systém předběžně charakterizovat přenosem:

$$G_s(s) = \frac{K_i}{[s(T_u s + 1)]} \quad (5.7)$$

kde $K_i = \frac{k}{u_k}$ (5.8)

Z předešlého přenosu, získaného metodou symetrického optima, jsou navrženy parametry PI regulátoru, kde zesílení je sníženo pro zabránění překmitů. V dalším kroku namísto konstantní akční veličiny metoda zamění její vstup za PI regulátor a s jeho pomocí se regulovaná veličina ustálí na žádané hodnotě. V tomto ustáleném okamžiku se zaznamenají hodnoty regulované veličiny y_∞ a odpovídající akční veličina u_∞ . Spočte se statické zesílení soustavy Z a doba náběhu T_n podle následujících vzorců

$$Z = \frac{(\vartheta_\infty - \vartheta_0)}{(u_\infty - u_0)} \quad (5.9)$$

$$T_n = \frac{K(u_k - u_0)}{k} \quad (5.10)$$

Tato metoda je vhodná převážně pro systémy s pomalou odezvou a dopravním zpožděním. Lze ji nalézt u výrobců, jako jsou Siemens, Allen Bradley, Mitsubishi, ABB, Honeywell apod. Často je označována pod názvem Accutune.

5.5 Metody využívané v softwarovém programu ET/KS98

Inženýrský program ET/KS98 lze chápat jako grafický editor, který komunikuje s regulátorem KS 98-1 nebo simulátorem SIM/KS98. Je určen k programování regulátoru KS 98-1, který nabízí tři typy regulačních bloků. První dva CONTR a CONTR+ lze efektivně aplikovat na statickou soustavu bez dominantního dopravního zpoždění. Třetí typ regulačního bloku PIDMA je vhodný pro obtížně regulovatelné procesy vyššího řádu s dominantním

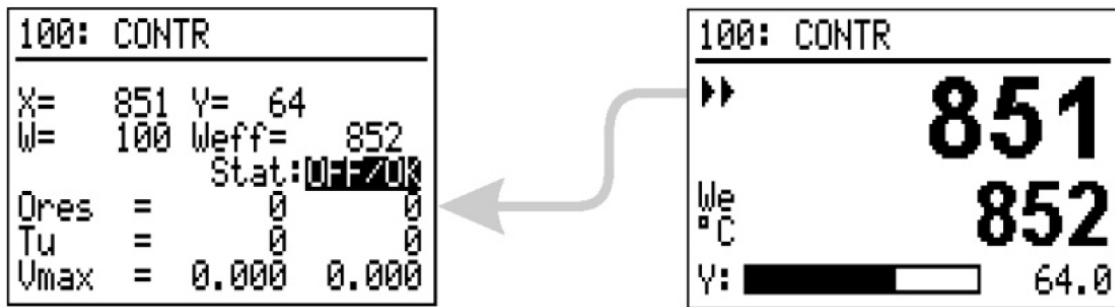
dopravním zpožděním. Především se liší svoji strukturou a optimalizačním algoritmem. Bloky CONTR a CONTR+ využívají sériovou strukturu PID regulátoru, zatímco PIDMA strukturu paralelní. V první části bude popsán optimalizační algoritmus prvních dvou typů.

Autotuning využívá principu otevřené smyčky a lze jej provést i u kaskádního zapojení. Na základě odezvy soustavy na skokovou změnu akční veličiny se stanoví doba průtahu T_u a maximální rychlost změny V_{max} . Na základě těchto hodnot se nastaví optimální regulační parametry regulátoru, které vyrovnají regulační odchylku na žádanou hodnotu bez překmitu podle typu regulačního algoritmu. Ten si uživatel nastaví změnou parametru T_n a T_v podle tabulky 5.1, kde hodnotou 0 se značí vypnutí parametru, který následně nebude při optimalizaci uvažován. V praxi často není možné přechodovou charakteristiku odměřit v celém jejím rozsahu, neboť regulovaný proces neumožní překročit technologickou mez. Z toho důvodu stačí proměřit pouze odezvu na dílčí skok a z těchto údajů určit maximální rychlost změny.

Tabulka 5.1 – Nastavení konstant regulátoru [PROFESS, 2006]

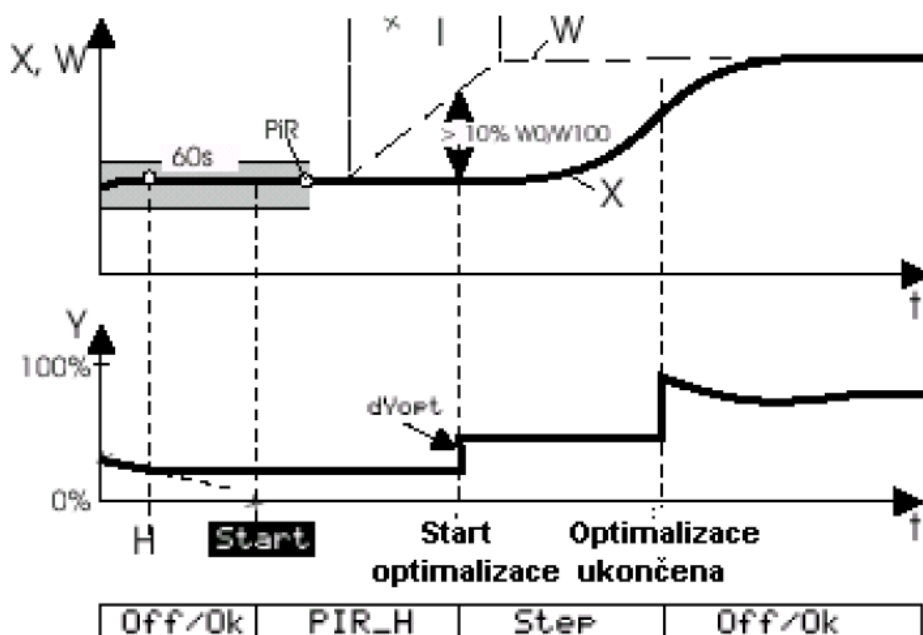
| | Integrační časová konstanta | Derivační časová konstanta |
|---------------|-----------------------------|----------------------------|
| Regulátor P | $T_n = 0$ | $T_v = 0$ |
| Regulátor PD | $T_n = 0$ | $T_v > 0$ |
| Regulátor PI | $T_n > 0$ | $T_v = 0$ |
| Regulátor PID | $T_n > 0$ | $T_v > 0$ |

Nutnou podmínkou pro úspěšnou optimalizaci je rezervace žádané hodnoty, kde odstup regulované a žádané hodnoty musí být větší než 10 % z rozsahu nastavení žádané hodnoty W_0 až W_{100} . Tento odstup zajistí obsluha ručním nastavením akční veličiny nebo žádané hodnoty v ručním režimu. Pokud tak neučiní, odstup je zajištěn automaticky snížením akční veličiny během detekce ustáleného stavu (PIR). Detekce ustáleného stavu je v regulátoru prováděna neustále. Ustálený stav se považuje tehdy, pokud po dobu 60 s regulovaná veličina nepřekročí toleranční pásmo $\pm \Delta X = 0,5 \%$. Při překročení se čítač umístěný v regulátoru nuluje.



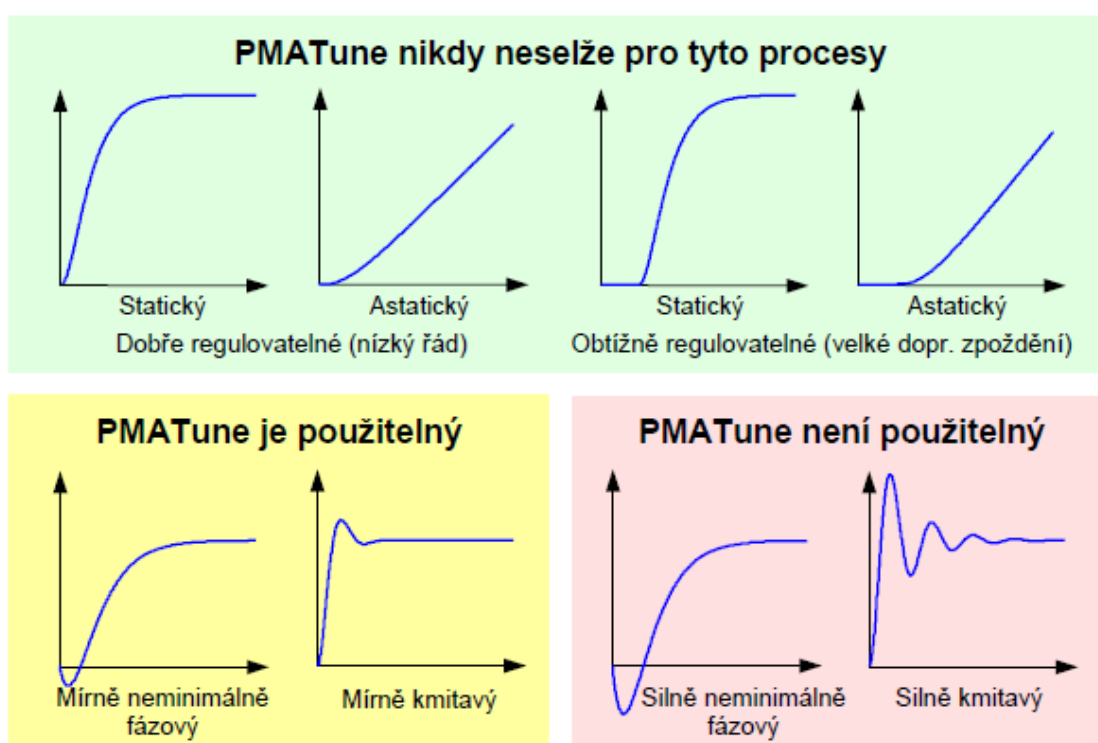
Obrázek 5.3 – Přejchod na stránku self-tuning [PROFESS, 2006]

Optimalizace se spouští z ovládacího panelu, kde v zadávacím poli na obrázku 5.3 je v počátku nastaven stav Stat: OFF/OK. Ten se pomocí ovládacích tlačítek přepne do stavu Stat: Start a tím se spustí proces hledání (ladění) parametrů regulátoru. Během optimalizace je možné měnit žádanou hodnotu, popřípadě optimalizaci kdykoliv ukončit přepnutím regulátoru do ručního režimu na čelním panelu nebo na ovládací stránce změnit stav na Stat: Stop. Při zdařilém optimalizačním procesu se regulátor nastaví s nově nalezenými parametry a přejde do automatického režimu. V opačném případě, při neúspěšné optimalizaci, se vypíše na panelu chybové hlášky, jejichž význam je možné najít v manuálu od výrobce a jsou uvedeny v příloze A. Celý proces je možné vidět na obrázku 5.4, kde X značí regulovanou veličinu, W žádanou hodnotu a Y akční veličinu. Parametr dY_{opt} určuje velikost akčního zásahu. U některých zařízení se musí snížit, aby nedošlo ke škodám vlivem velkého skoku akční veličiny.



Obrázek 5.4 – Průběh self-tuningu [PROFESS, 2006]

Blok PIDMA se využívá pro obtížně regulovatelné procesy a nabízí stejnou metodu optimalizace jako expertní program PMA Tune. Oproti předchozím typům poskytuje možnost regulace s dvěma stupni volnosti (rozdílnou reakci regulátoru na změnu žádané hodnoty). Další nadstavbou je volitelné nastavení zesílení derivační složky. Před samotnou optimalizací je zapotřebí nastavit několik parametrů, které určují podmínky pro optimalizaci. Parametr *PType* uvádí, o jaký regulovaný proces se jedná (statický nebo astatický). Pomocí parametru *Drift* lze zapnout kompenzaci driftu, kdy regulovaná veličina plynule klesá nebo stoupá. Následuje řada parametrů, jak se má chovat regulační smyčka po optimalizaci. Na obrázku 5.5 je uvedeno pro jaké typy procesů je blok PIDMA použitelný.



Obrázek 5.5 – Použitelné typy procesů pro PMA Tune [PROFESS, 2006]

5.6 Metody využívaná v prostředí PMA Tune

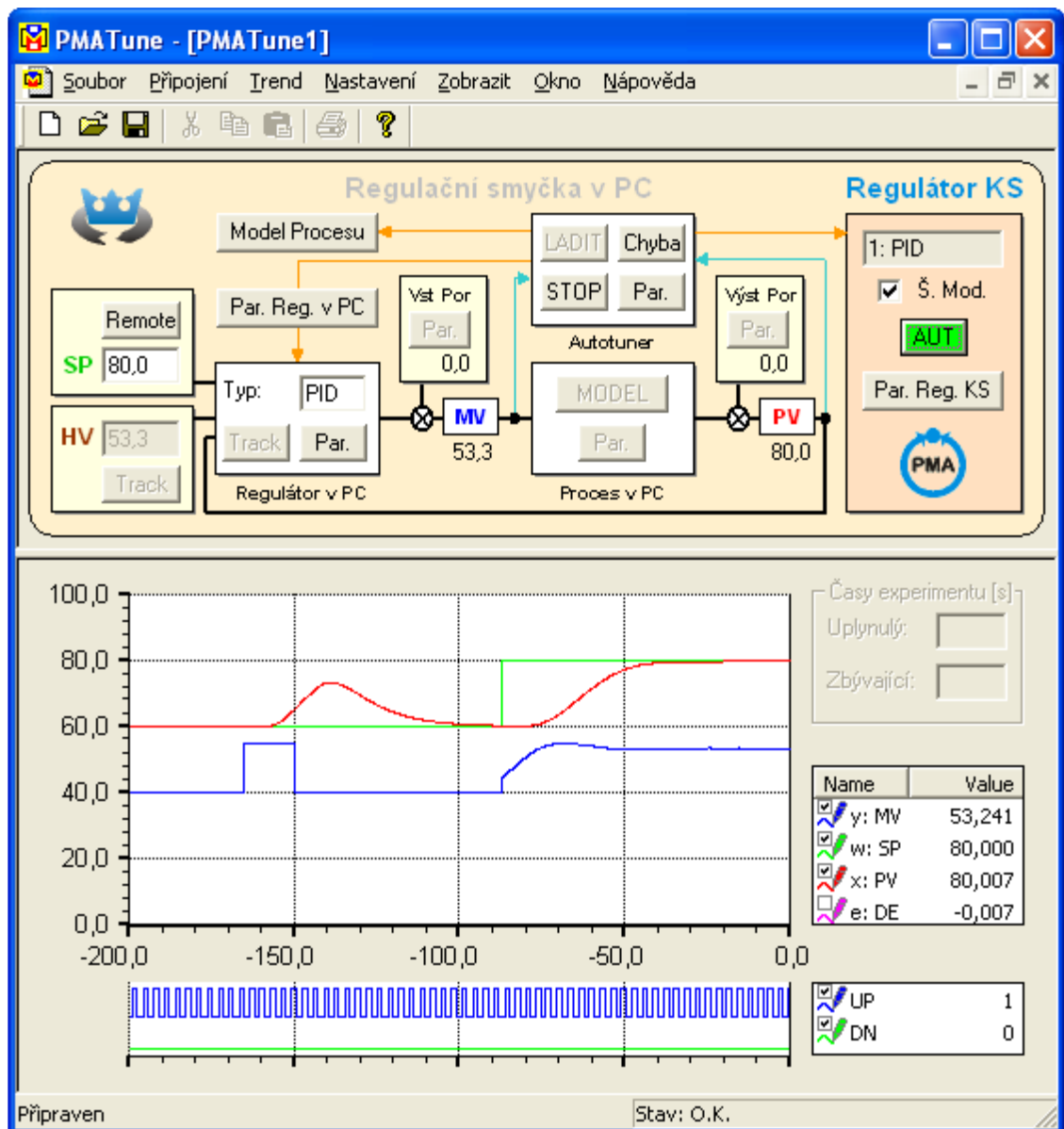
Prostředí PMA Tune byl vyvinut firmou REX Controls a slouží k nalezení parametrů regulátoru pro všechny typy regulátorů s označením KS. Firma REX Controls zaručuje nalezení robustních PID parametrů za předpokladů, že řízený proces je dostatečně popsán přenosovou funkcí ve tvaru:

$$F(s) = \frac{K e^{-Ds}}{s^l (\tau_1 s + 1) (\tau_2 s + 1) \dots (\tau_n s + 1)} \quad (5.11)$$

| | | |
|-----|------------------|--|
| kde | K | zesílení procesu |
| | $D > 0$ | dopravní zpoždění |
| | $T_i > 0$ | časové konstanty procesu ($i=1,2,\dots,n$) |
| | $l = 0$ nebo 1 | proces statický nebo astatický |

Metoda úspěšně dává vyhovující výsledky i pro procesy s dominantním dopravním zpožděním. Na obrázku 5.5 lze vidět různé typy přechodových charakteristik procesů, pro které je metoda PMA Tune použitelná. Prostředí PMA Tune dovede pracovat jak se skutečným regulátorem KS, tak i v simulačním režimu s pomocným regulátorem v PC. Komunikace s regulátorem probíhá pomocí sériového portu kabelem dodávaným výrobcem PMA.

Před samotnou optimalizací je nutné nastavit několik parametrů pro úspěšné ladění. Obsluha musí zadat typ navrhovaného regulátoru, rychlost uzavření smyčky a velikost budicího pulzu. Posléze je nutné dosáhnout ustáleného stavu regulované soustavy a odstartovat ladicí algoritmus. Prostředí PMA Tune je rozděleno na dvě části a je vidět na obrázku 5.6. V horní části je nakresleno schéma uzavřeného regulačního obvodu s pokročilým autotunerem a v dolní části je zobrazeno okno trendů.



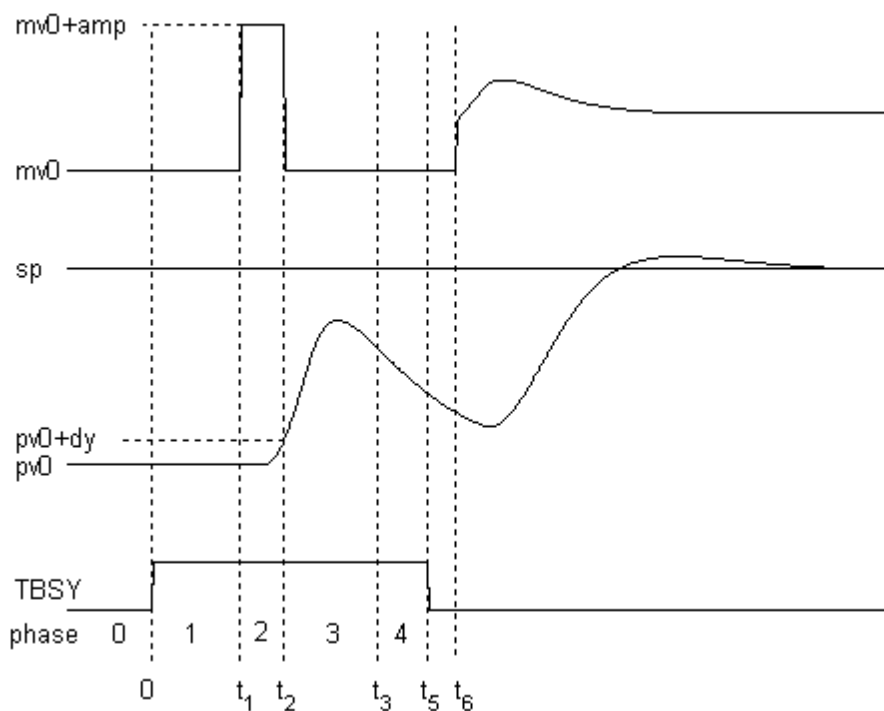
Obrázek 5.6 – Uživatelské prostředí PMA Tune [REX CONTROLS, 2003]

Po spuštění procesu samočinného nastavení parametrů regulátoru a při ustáleném stavu regulované soustavy se vygeneruje pravoúhlý pulz a měří se odpovídající odezva soustavy. Na základě této odezvy se vypočítají parametry regulátoru. Tyto parametry se přepošlou do regulátoru KS nebo do simulovaného regulátoru v PC. Uživatel si může zvolit jednu ze tří rychlostí odezvy uzavřené smyčky:

- pomalá – překmit < 5 %,
- normální – překmit < 10 %,
- rychlá – překmit okolo 20 %.

Samotnou proceduru automatického ladění lze rozdělit do čtyř fází. Jednotlivé fáze lze vidět na obrázku 5.7.

1. odhad driftu a šumu
2. generování pulzu
3. hledání extrému odezvy
4. extrapolace odezvy



Obrázek 5.7 – Typický průběh ladicího experimentu [REX CONTROLS, 2003]

5.7 Metody využívané v prostředí BlueControl Expert

Prostředí BlueControl od firmy PMA je softwarový nástroj pro parametrizaci, simulaci, spouštění a diagnostiku regulátorů řady BluePort. Program nabízí snadnější konfiguraci parametrů, kromě toho umožňuje archivaci a tisk nastavení.

Regulační parametry bývají optimální pouze k určitým stavům regulovaného procesu, proto algoritmus samočinného nastavení v prostředí BlueControl nabízí dvě základní techniky optimalizace – při náběhu a optimalizaci na žádané hodnotě. Pokud se regulátor chová odlišně v určitém rozmezí stavů regulovaného procesu, je možnost pro tyto stavy procesu mít dvě různé sady parametrů a mezi nimi přepínat. U optimalizace při náběhu je nutné, aby byl mezi regulovanou veličinou a žádanou hodnotou dostatečný odstup. Při optimalizaci na žádané hodnotě regulátor zanes do regulovaného procesu poruchu ve formě impulsu na straně akční

veličiny a vyhodnocuje se reakce regulované veličiny. Výhodou optimalizace na žádané hodnotě je působení pouze malé regulační odchylky. Prostředí BlueControl umožňuje kombinaci těchto dvou technik, které budou simulovány v kapitole 7. Kombinace metod jsou:

- skoková funkce při startu + impulzní na žádané hodnotě,
- impulzní funkce při startu i na žádané hodnotě,
- pouze skoková funkce při startu.

6 Kritéria kvality regulačního pochodu

Aby bylo možné hodnotit kvalitu regulačních pochodů, je nezbytné striktně stanovit měřítko, podle kterého se bude kvalita regulace posuzovat. U regulačních pochodů to může být např. doba náběhu, čas ustálení regulačního obvodu, či cena spotřebované energie. Do značné míry je při výběru vhodného kritéria důležitý fakt, co se od řízeného procesu očekává. Kvalita regulace se nejčastěji posuzuje v časové oblasti na základě průběhu regulované veličiny v závislosti na čase vyvolaného skokovou změnou žádané veličiny.

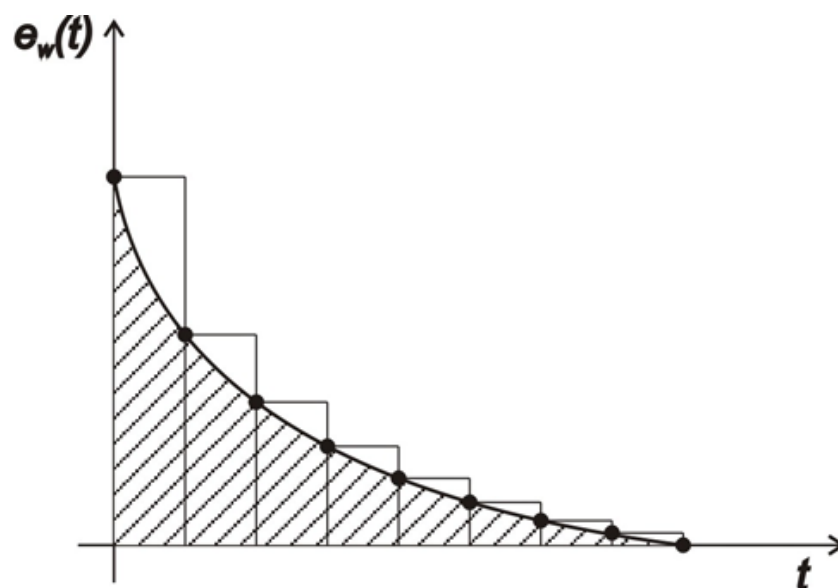
Značně rozšířenými klasickými kritérii v regulační technice jsou sumačně integrální kritéria. Jedná se o posouzení a vyhodnocení kvality regulačního pochodu na základě průběhu regulační odchylky a akční veličiny. V obou případech hodnotíme plochu mezi ideální a skutečnou přechodovou charakteristikou. Čím je plocha menší, tím je vyšší kvalita regulačního pochodu. Nejčastěji se definují s lineární nebo kvadratickou závislostí na regulační ploše. Snížení kvadratické regulační plochy, na rozdíl od lineární, vede vždy ke stabilitě obvodu.

6.1 Kritérium lineární regulační plochy – IE

Jedná se o základní kritérium, které je vhodné pouze pro aperiodické regulační pochody. Pokud by se nacházel regulační pochod na mezi stability, plochy pod kladnými a zápornými půlvlnami by se odečetly a integrál J_{IE} by byl minimální.

$$J_{IE} = \int_0^{\infty} e(t) dt \quad (6.1)$$

Integrál představuje plochu ohraničenou horizontální a vertikální osou, shora omezenou průběhem křivky $e(t)$, jak je vidět na obrázku 6.1.

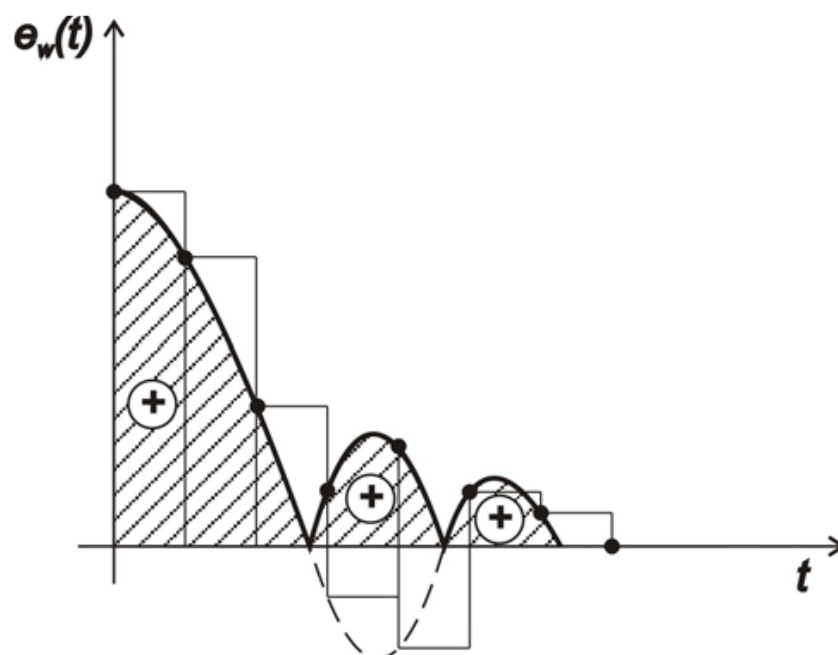


Obrázek 6.1 – Lineární regulační plocha – IE [ŠČEVÍK, 2008]

6.2 Absolutní regulační plocha – IAE, ITAE

Tento typ kritéria lze použít pro kmitavé regulační pochody. Všechny plochy pod křivkou $e(t)$ mají v absolutní hodnotě kladné znaménko.

$$J_{IAE} = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (6.2)$$



Obrázek 6.2 – Absolutní regulační plocha – IAE [ŠČEVÍK, 2008]

Pokud toto kritérium doplníme o dobu regulace, bude jednak minimalizovat regulační plochu, ale i minimalizovat dobu regulace. Výsledné kritérium bude mít tvar:

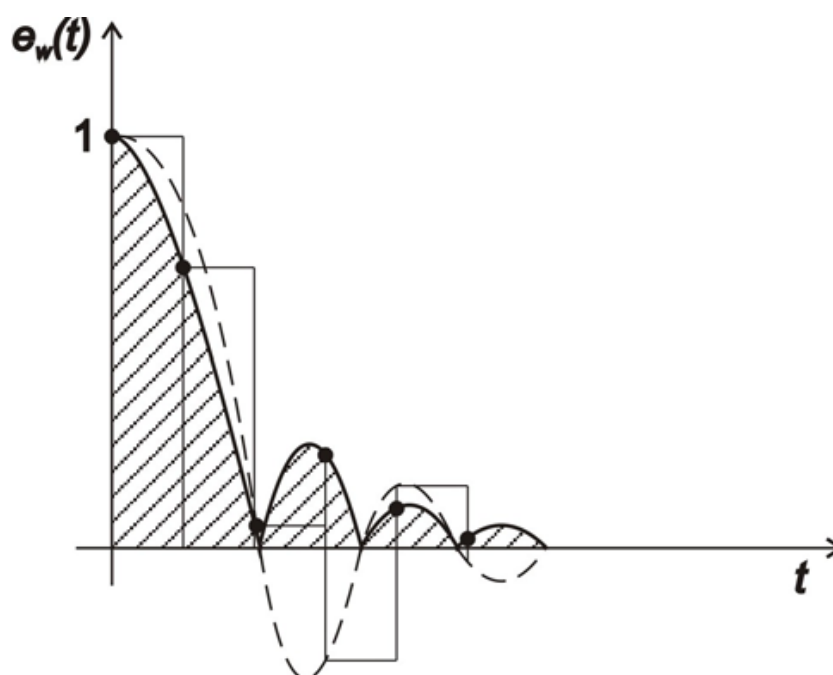
$$J_{ITAE} = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (6.3)$$

6.3 Kvadratická regulační plocha – ISE

Toto kritérium je vhodné pro kmitavé i nekmitavé regulační pochody. Všechny plochy pod křivkou $e^2(t)$ jsou kladné. Kritérium lze doplnit o penalizaci kvadrátu akční veličiny a má pak tvar 6.5, kde φ je váhový koeficient.

$$J_{ISE} = \int_0^{\infty} e^2(t)dt \quad (6.4)$$

$$J_{ISE} = \int_0^{\infty} [e^2(t) + \varphi u^2(t)]dt \quad (6.5)$$

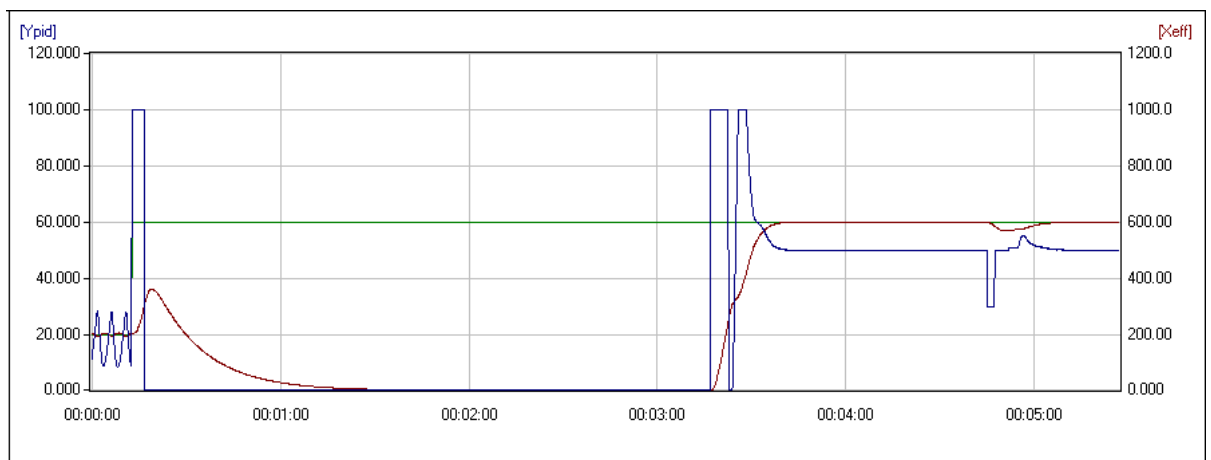


Obrázek 6.3 – Kvadratická regulační plocha [ŠČEVÍK, 2008]

7 Simulace a ověření

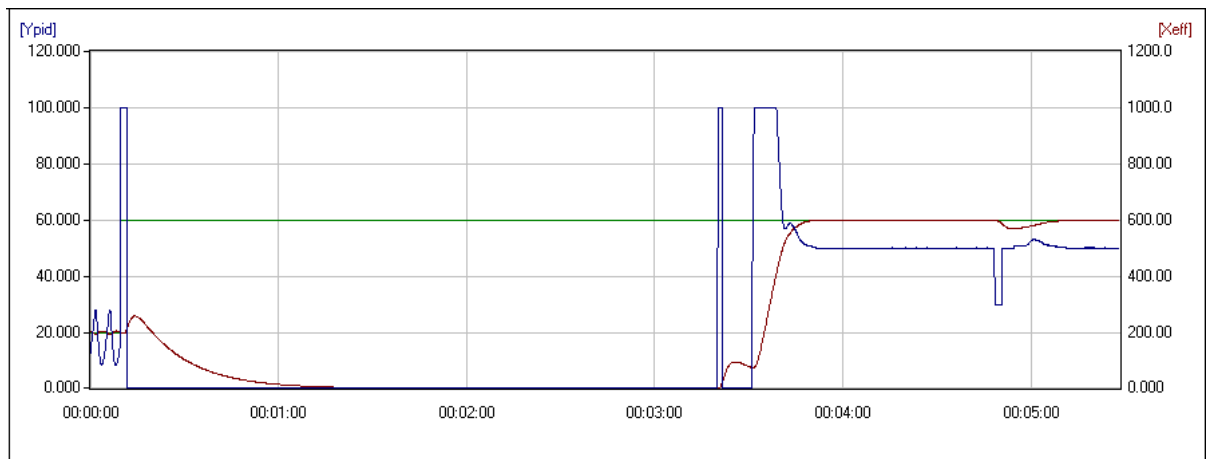
7.1 Prostředí BlueControl Expert

Prostředí BlueControl nabízí tři možnosti samooptimalizace. První typ, který prostředí nabízí, je skoková funkce při startu + impulzní na žádané hodnotě. Optimalizační průběh je uveden na obrázku 7.1. První předpoklad úspěšného nalezení parametrů je odstup regulované veličiny minimálně o 10 % pod žádanou hodnotou. Toho lze dosáhnout skokovou změnou žádané hodnoty a následně spustit proces samočinného nastavení regulátoru, viz obrázek 7.1, v čase cca 20 s. Poté regulátor v prvním kroku nastaví akční veličinu na 0 % a čeká na ustálení regulované veličiny, tomu odpovídá její pokles na obrázku 7.1 (červená křivka). Po ustálení začne působit skoková změna akční veličiny na 100 % a zpět. Z reakcí regulované veličiny jsou stanoveny optimální parametry regulátoru. V třetím kroku regulovaná veličina pokračuje na žádanou hodnotu s novými parametry. Následně se po ustálení provede ještě pulz na akční veličině a na základě průběhu odezvy mohou být parametry regulátoru ještě modifikovány. U třístavové regulace proběhne po ustálení regulované veličiny skoková změna akční veličiny do záporných hodnot a optimalizují se parametry pro chlazení.



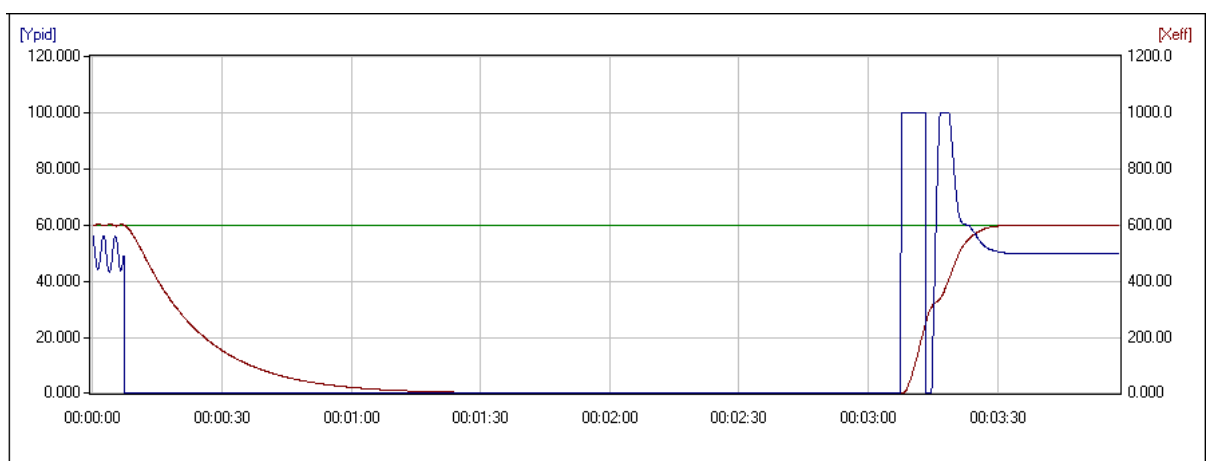
Obrázek 7.1 – skoková funkce při startu + impulzní na žádané hodnotě

Druhým typem auto-tuningu je impulzní funkce při startu i na žádané hodnotě, viz obrázek 7.2. Tento algoritmus nabízí téměř totožný optimalizační průběh jako předchozí typ optimalizace. Rozdíl je pouze ve změně akční veličiny, zde již není skoková změna, ale krátký impuls akční veličiny na 100 % a zpět.



Obrázek 7.2 – impulzní funkce při startu i na žádané hodnotě

Třetím typem auto-tuningu je pouze skoková funkce při startu. Průběh optimalizace je znázorněn na obrázku 7.3. Zde se před zahájením optimalizace neprovádí skok žádané hodnoty, ale pouze stačí odstartovat proces samočinného nastavení regulátoru. Optimalizace na začátku detekuje oscilaci procesu, pokud bude větší, než $\pm 0,5\%$, nastaví konzervativní parametry regulátoru pro uklidnění procesu. Pokud bude proces ustálený, začne klesat regulovaná veličina k nule. Za ustálený proces se považuje stav, kdy oscilace nepřesáhne rozmezí $\pm 0,5\%$ z regulačního rozsahu. Poté se zanesou impuls akční veličiny a z následné odezvy regulované veličiny stanoví nové parametry regulátoru. S těmi se vyreguluje na požadovanou hodnotu.



Obrázek 7.3 – pouze skoková funkce při startu

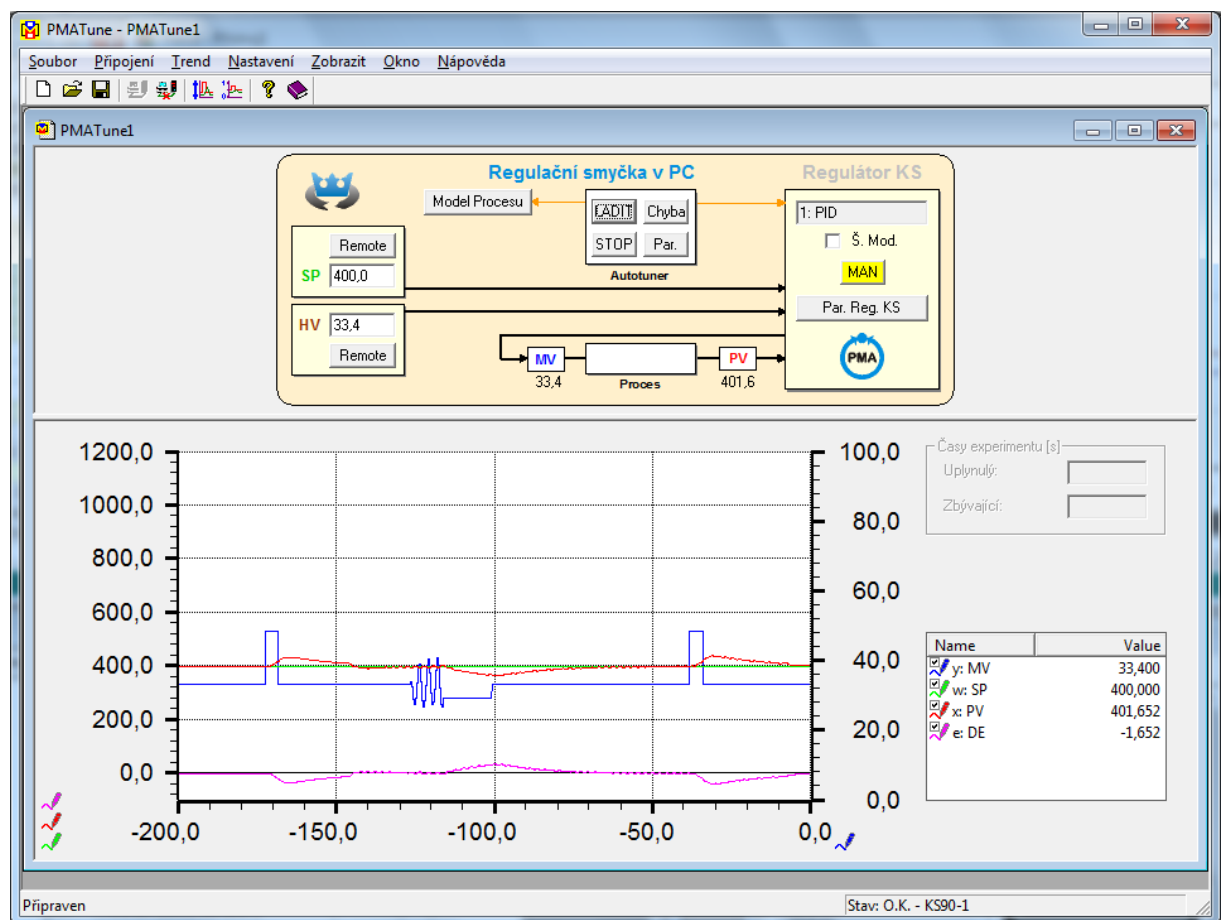
7.2 Aplikace PMATune

Inženýrský software PMATune umožňuje propojení jak se skutečným regulátorem, tak se simulačním prostředím BlueControl. Na obrázku 7.4 je v okně trendu vidět totožný ladící

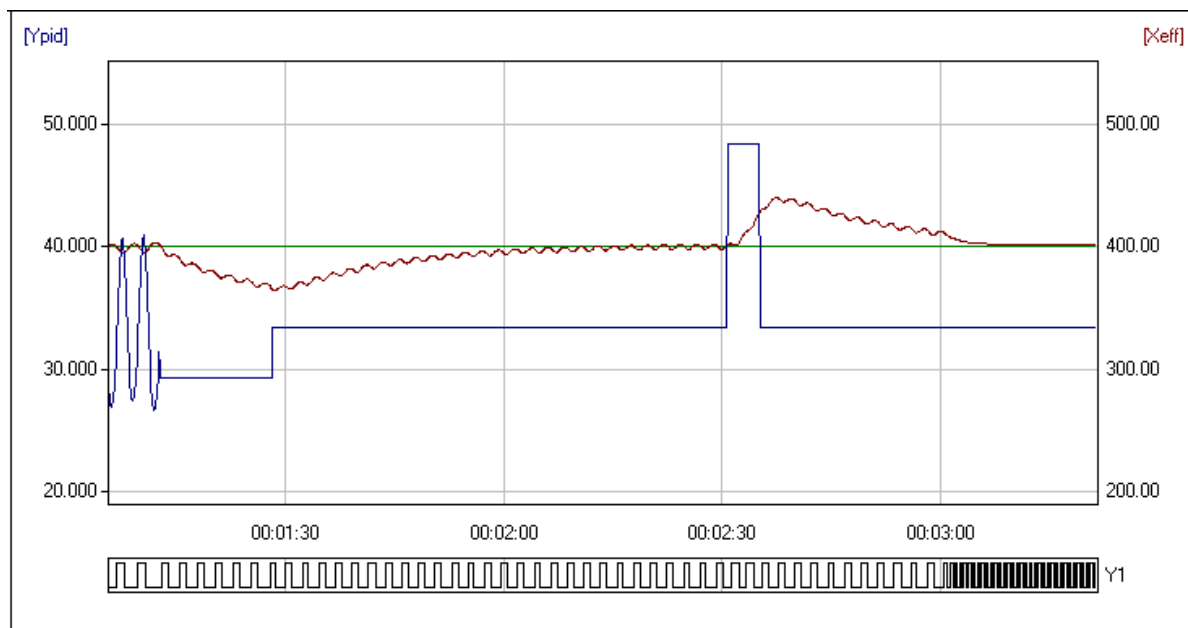
průběh jako v prostředí BlueControl, viz obrázek 7.5. Před spuštěním ladicího procesu je nutné ustálit řízený proces. Toho lze dosáhnout přepnutím regulátoru do manuálního režimu a snahou ručně najít takovou hodnotu akční veličiny, aby regulovaná veličina dosáhla žádané hodnoty. Tato část je vidět na obrázku 7.5 mezi první a druhou minutou. Jakmile má regulovaná veličina stejnou hodnotu jako žádaná, lze spustit ladicí experiment (okamžik cca 2:30 minut). Automatické ladění je rozděleno do čtyř fází:

- odhad driftu a šumu,
- generování pulzu,
- hledání extrému odezvy,
- extrapolace odezvy.

Po vyhodnocení odezvy na skok akční veličiny a vypočtení optimálních parametrů, program nabídne parametry vypočtené autotunerem. Program nabízí přepočet parametrů v případě, že si obsluha přeje jinou rychlost uzavřené smyčky popřípadě jiný typ regulátoru. V případě připojení reálného regulátoru se v této části překopírují navržené parametry do regulátoru a regulátor s nimi dále pracuje.



Obrázek 7.4 – Ladicí proces regulátoru KS90-1 v prostředí PMATune



Obrázek 7.5 – Ladicí proces regulátoru KS90-1 v prostředí BlueControl

7.3 Simulace v prostředí Matlab and Simulink

System MATLAB je integrované prostředí pro vědeckotechnické výpočty a vizualizaci dat. Vyvinula ho firma The Mathworks v roce 1984 v USA a název MATLAB vznikl z anglických slov MATrix LABoratory. Od samotného začátku prošel dlouhým vývojem, kdy vznikala spousta rozšíření ve formě toolboxů. Asi nejpoužívanější nadstavbou je SIMULINK, který slouží k simulaci a modelování dynamických systémů. SIMULINK využívá pro svoje numerické řešení algoritmy MATLABu. Do SIMULINKu se zapisují příkazy ve formě blokových schémat či samostatných rovnic a díky tomu lze snadno vytvářet modely dynamických soustav.

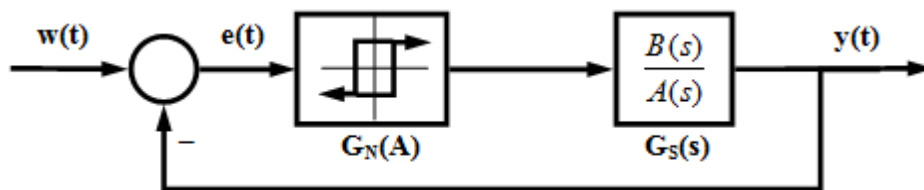
Ziegler a Nichols publikovali v roce 1945 dvě metody pro nastavení PID regulátoru. Jednalo se vůbec o první metody k nastavování regulátoru. Pro jejich jednoduchost a výjimečnost, kdy není zapotřebí hlubokých vědomostí z oblasti řízení, přežily metody až do současnosti a jsou využívány jak při ručním, tak automatickém nastavování regulátoru. U obou metod je zapotřebí měření na reálném soustavě, popřípadě data získat simulačně.

7.3.1 Metoda kritických kmitů

Také někdy označována jako metoda kritického zesílení a kritické frekvence. Základní myšlenkou je přivést soustavu na mez stability a odtud odečíst zmiňované kritické hodnoty. Soustava se přivede na mez stability pomocí proporcionální složky ve zpětné vazbě, tedy zvyšováním zesílení (P složky) do doby, kdy je obvod na hranici stability a netlumeně kmitá.

Zesílení regulátoru, při kterém soustava netlumeně kmitá, nazýváme kritické zesílení a periodu kmitů jako kritickou periodou. Tyto kritické hodnoty se pomocí empirických vztahů v tabulce 7.1 přepočítají na stavitelné parametry regulátoru.

Z důvodu rizikového experimentu, kdy kmitající soustava se nachází na hranici stability, navrhli Hägglund a Åström v roce 1983 způsob, který Ziegler-Nicholovu metodu nahrazuje a automatizuje. Jedná se o nahrazení P regulátoru pomocí symetrického relé ve zpětné vazbě na obrázku 7.6. Tuto metodu zautomatizovala a převzala řada firem.

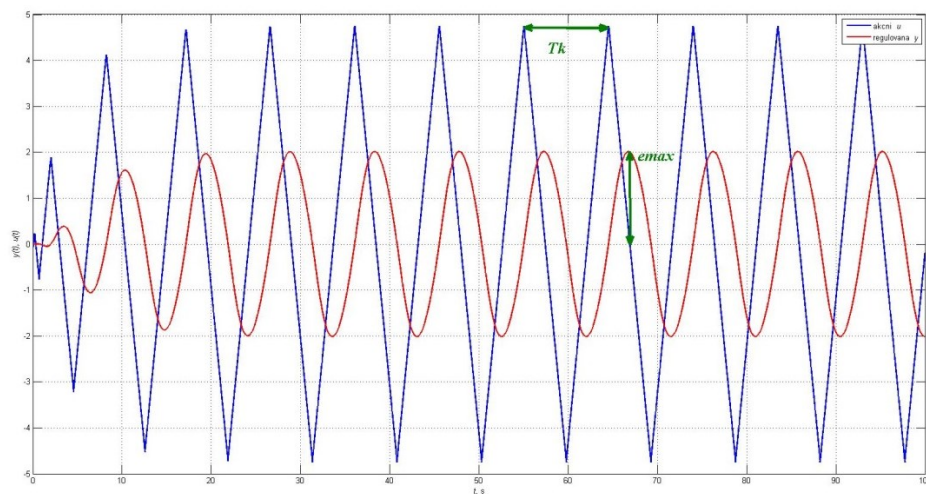


Obrázek 7.6 – Relé ve zpětné vazbě [KORBALE, 2011]

Podmínka vzniku stabilního mezního cyklu je, aby fázový rozdíl mezi vstupním a výstupním signálem byl 180° .

$$G_s(j\omega) = -\frac{1}{G_N(A)} \quad (7.1)$$

Z kapitoly 5.2 je známo, že obvod se chová jako dolní propust, kdy vyšší harmonické signály soustava odfiltruje. Z průběhu regulované veličiny na obrázku 7.7 se odečte kritická perioda a amplituda na výstupu reléové nelinearity. Odečtená amplituda se dosadí do vzorce pro výpočet kritického zesílení. Pro zpřesnění odhadů se může použít saturační relé.



Obrázek 7.7 – Oscilace vstupních a výstupních veličin

$$r_k = \frac{4M}{\pi A} \quad (7.2)$$

kde M amplituda na výstupu reléové nelinearity,
 π Ludolfovo číslo,
 A amplituda vstupního signálu.

Tabulka 7.1 – Ziegler-Nicholsova metoda z kritických parametrů

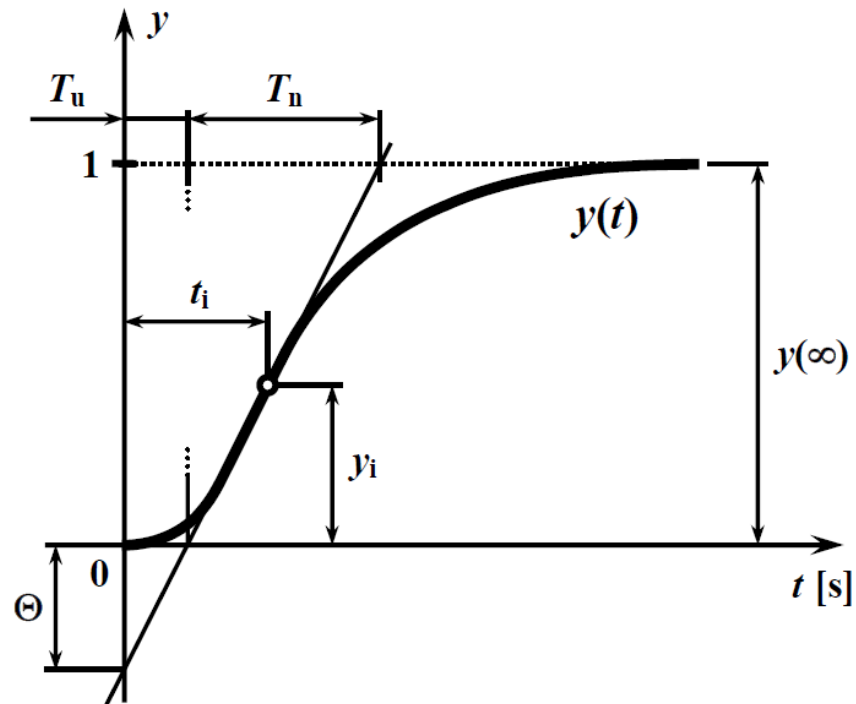
| Typ regulátoru | Standardní tvar | | | Sériový tvar | | |
|----------------|-----------------|------------|------------|--------------|------------------|-------------------|
| | r_0 | T_I | T_D | r_0^* | T_i^* | T_d^* |
| P | $0,5 r_0$ | - | - | $0,5 r_0^*$ | - | - |
| PI | $0,45 r_0$ | $0,85 T_k$ | - | $0,45 r_0^*$ | $0,54 r_0^*/T_k$ | - |
| PD | $0,4 r_0$ | - | $0,05 T_k$ | $0,4 r_0^*$ | - | $0,02 r_0^* T_k$ |
| PID | $0,6 r_0$ | $0,5 T_k$ | $0,12 T_k$ | $0,6 r_0^*$ | $1,2 r_0^*/T_k$ | $0,075 r_0^* T_k$ |

7.3.2 Metoda přechodové odezvy

Jedná se o druhou metodu Zieglera a Nicholse k nastavení parametrů PID regulátoru. Z naměřené odezvy systému na skokovou změnu žádané hodnoty se určí doba průtahu T_u , doba náběhu T_n a statické zesílení k . Tyto tři hodnoty lze změřit proložením přechodové odezvy tečnou v inflexním bodě, viz obrázek 7.8. Inflexní bod odpovídá maximu váhové funkce, kterou lze získat pomocí derivace přechodové funkce.

Při znalosti doby náběhu a doby průtahu lze vypočítat normalizované zpoždění θ (théta) podle následujícího vzorce

$$\theta = \frac{T_u}{T_n} \quad (7.3)$$



Obrázek 7.8 – Základní parametry přechodové odezvy [KUPKA, 2008]

Přepočítání těchto čtyř parametrů na parametry PID regulátoru je možný pomocí tabulky 7.2.

Tabulka 7.2 – Ziegler-Nicholsova metoda přechodové charakteristiky

| Typ regulátoru | Standardní tvar | | | Sériový tvar | | |
|----------------|-------------------|-----------|-----------|------------------|---------|---------|
| | r_0 | T_I | T_D | r_0^* | T_i^* | T_d^* |
| P | $1 / k \Theta$ | - | - | $1 / k \Theta$ | - | - |
| PI | $0,9 / k \Theta$ | $3,5 T_u$ | - | $0,9 / k \Theta$ | $3 T_u$ | - |
| PID | $1,25 / k \Theta$ | $2 T_u$ | $0,5 T_u$ | $0,6 / k \Theta$ | T_u | T_u |

8 Vyhodnocení

Nalezené parametry získané pomocí uvedených metod, byly vloženy do navrhnutého regulátoru v softwaru MATLAB & SIMULINK. Pro vyhodnocení kvality regulačního pochodu byl napsán skript, který počítá absolutní regulační plochu ITAE a kvadratickou regulační plochu ISE. Následně změří maximální překmit, který reprezentuje hodnotu, kdy regulovaná veličina dosáhne svého maxima. Doba odezvy představuje čas, kdy regulovaná veličina dosáhne 95 % žádané hodnoty. Doba ustálení je čas, kdy se hodnota regulované veličiny nachází v pásmu $\pm 5\%$ v okolí žádané hodnoty. Všech pět kritérií kvality je u jednotlivých metod auto-tuningu vypsáno v tabulkách 8.1 až 8.3. Tomu odpovídající regulační pochody společně s nalezenými parametry jsou uvedeny níže.

Tabulka 8.1 – Regulátor KS/90-1

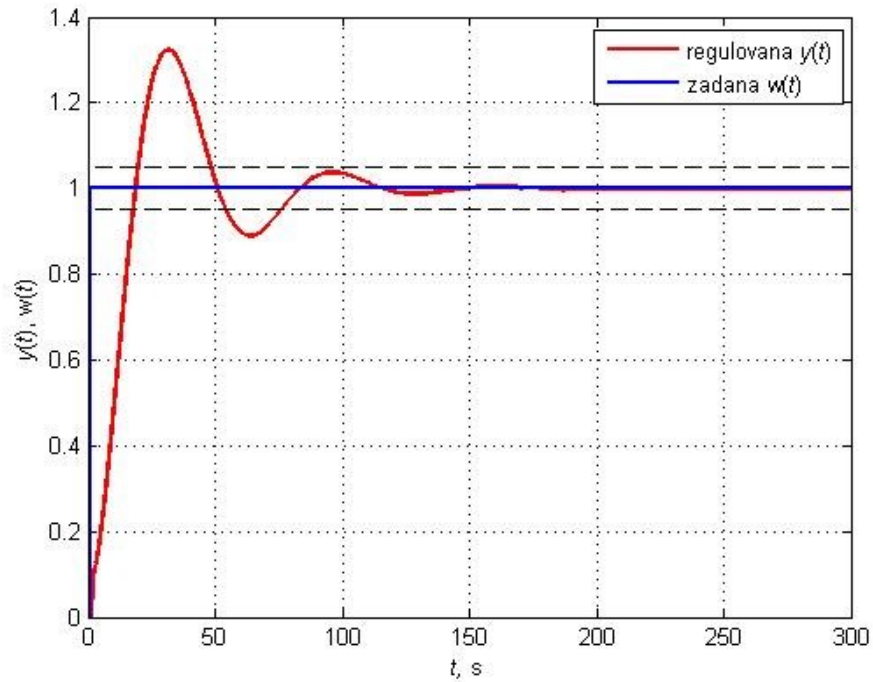
| | Hodnota ITAE | Hodnota ISE | Max. překmit, % | Doba odezvy, s | Přibližná doba ustálení, s |
|--|--------------|-------------|-----------------|----------------|----------------------------|
| Prostředí BlueControl | | | | | |
| Skoková funkce při startu + impulzní na žádané hodnotě | 554,9 | 8,21 | 32,41 | 17,85 | 76,2 |
| Impulzní funkce při startu i na žádané hodnotě | 556,8 | 8,24 | 32,37 | 17,92 | 76,91 |
| Pouze skoková funkce při startu | 557,1 | 8,13 | 34,55 | 16,87 | 73,11 |
| PMA Tune | | | | | |
| Normální rychlost smyčky | 1288 | 24,67 | 3,43 | 78,9 | 78,9 |
| Rychlá rychlost smyčky | 884,7 | 15,4 | 15,8 | 39,53 | 93,57 |

Tabulka 8.2 – Regulátor KS/98-1

| | Hodnota ITAE | Hodnota ISE | Max. překmit, % | Doba odezvy, s | Přibližná doba ustálení, s |
|--------------------------|--------------|-------------|-----------------|----------------|----------------------------|
| Prostředí SIM/KS98 | | | | | |
| Blok CONTR | 56,04 | 1,73 | 43,2 | 2,68 | 23,76 |
| Blok PIDMA | 714,9 | 16,2 | 3,93 | 57,68 | 57,68 |
| PMA Tune | | | | | |
| Normální rychlost smyčky | 1016 | 19,41 | 8,5 | 55,67 | 113,6 |
| Rychlá rychlost smyčky | 803,1 | 12,26 | 25,97 | 27,18 | 103,8 |

Tabulka 8.3 – Metody Zieglera Nicholse

| | Hodnota ITAE | Hodnota ISE | Max. překmit, % | Doba odezvy, s | Přibližná doba ustálení, s |
|-----------------------------------|--------------|-------------|-----------------|----------------|----------------------------|
| Relé ve zpětné vazbě | 13,45 | 1,58 | 42,03 | 2,68 | 11,2 |
| Pomocí přechodové charakteristiky | 9,71 | 1,72 | 111,02 | 2,27 | 7,74 |



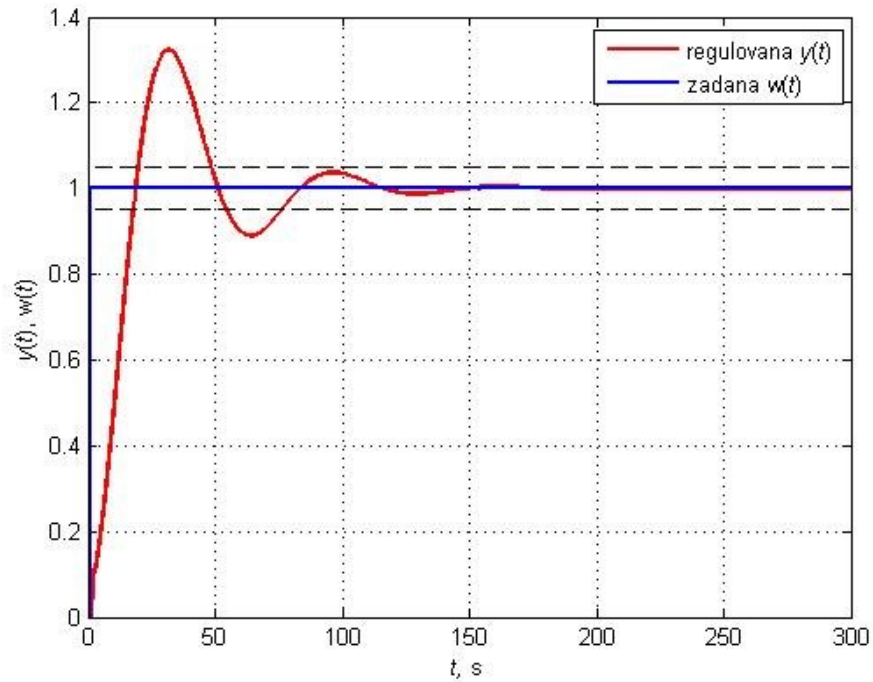
Obrázek 8.1 – Regulační průběh regulátoru KS/90-1, metoda skokové funkce při startu + impulzní na žádané hodnotě

Tabulka 8.4 – Kritéria kvality regulátoru KS/90-1, metoda skokové funkce při startu + impulzní na žádané hodnotě

| Prostředí BlueControl | Hodnota ITAE | Hodnota ISE | Max. překmit, % | Doba odezvy, s | Přibližná doba ustálení, s |
|--|--------------|-------------|-----------------|----------------|----------------------------|
| Skoková funkce při startu + impulzní na žádané hodnotě | 554,9 | 8,21 | 32,41 | 17,85 | 76,2 |

Tabulka 8.5 – Parametry regulátoru KS/90-1 získané pomocí skokové funkce při startu + impulzní na žádané hodnotě

| Prostředí BlueControl | r_0 | T_i | T_d |
|--|-------|-------|-------|
| Skoková funkce při startu + impulzní na žádané hodnotě | 0,63 | 2,80 | 2,80 |



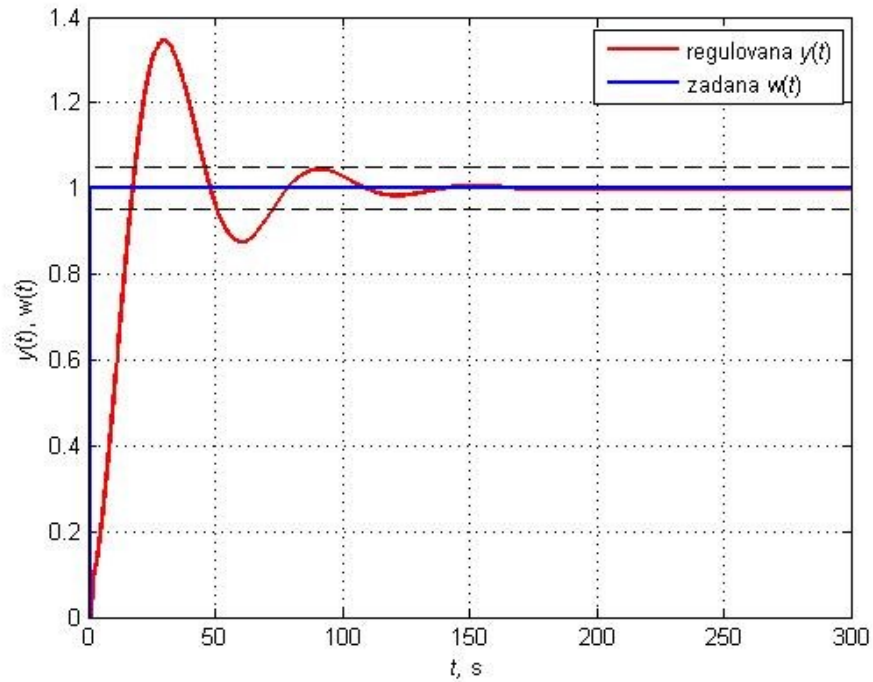
Obrázek 8.2 – Regulační průběh regulátoru KS/90-1, metoda impulzní funkce při startu i na žádané hodnotě

Tabulka 8.6 – Kritéria kvality regulátoru KS/90-1, metoda impulzní funkce při startu i na žádané hodnotě

| Prostředí BlueControl | Hodnota ITAE | Hodnota ISE | Max. překmit, % | Doba odezvy, s | Přibližná doba ustálení, s |
|--|--------------|-------------|-----------------|----------------|----------------------------|
| Impulzní funkce při startu i na žádané hodnotě | 556,8 | 8,24 | 32,37 | 17,92 | 76,91 |

Tabulka 8.7 – Parametry regulátoru KS/90-1 získané pomocí impulzní funkce při startu i na žádané hodnotě

| Prostředí BlueControl | r_0 | T_i | T_d |
|--|-------|-------|-------|
| Impulzní funkce při startu i na žádané hodnotě | 0,63 | 2,80 | 2,80 |



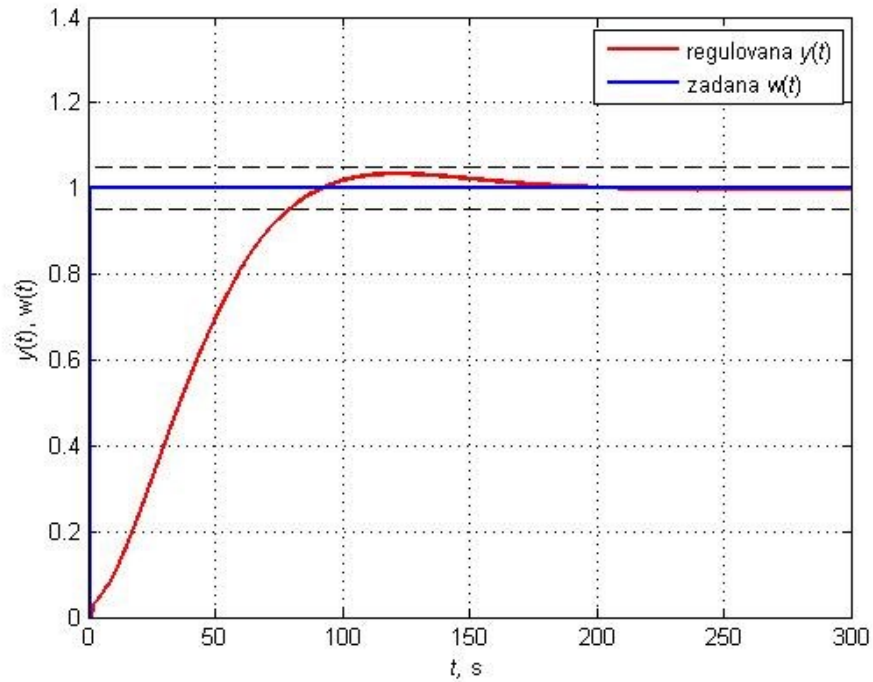
Obrázek 8.3 – Regulační průběh regulátoru KS/90-1, metoda skokové funkce při startu

Tabulka 8.8 – Kritéria kvality regulátoru KS/90-1, metoda skokové funkce při startu

| Prostředí BlueControl | Hodnota ITAE | Hodnota ISE | Max. překmit, % | Doba odezvy, s | Přibližná doba ustálení, s |
|---------------------------------|--------------|-------------|-----------------|----------------|----------------------------|
| Pouze skoková funkce při startu | 557,1 | 8,13 | 34,55 | 16,87 | 73,11 |

Tabulka 8.9 – Parametry regulátoru KS/90-1 získané pomocí skokové funkce při startu

| Prostředí BlueControl | r_0 | T_i | T_d |
|---------------------------------|-------|-------|-------|
| Pouze skoková funkce při startu | 0,65 | 2,60 | 2,60 |



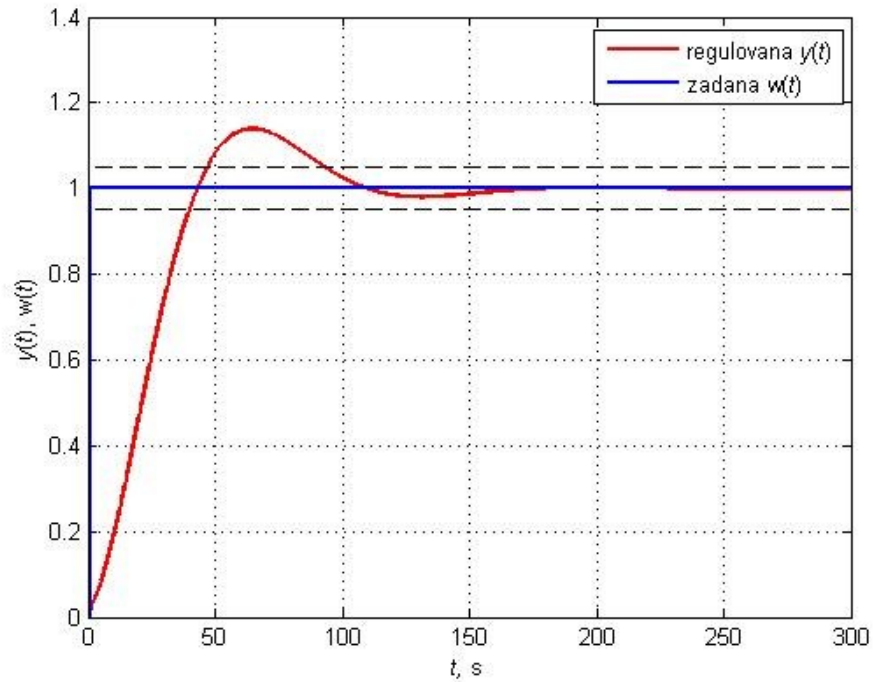
Obrázek 8.4 – Regulační průběh regulátoru KS/90-1, seřízení pomocí PMA Tune – normální rychlost smyčky

Tabulka 8.10 – Kritéria kvality regulátoru KS/90-1, seřízení pomocí PMA Tune – normální rychlost smyčky

| PMA Tune | Hodnota ITAE | Hodnota ISE | Max. překmit, % | Doba odezvy, s | Přibližná doba ustálení, s |
|--------------------------|--------------|-------------|-----------------|----------------|----------------------------|
| Normální rychlost smyčky | 1288 | 24,67 | 3,43 | 78,9 | 78,9 |

Tabulka 8.11 – Parametry regulátoru KS/90-1 získané pomocí PMA Tune – normální rychlost smyčky

| PMA Tune | r_0 | T_i | T_d |
|--------------------------|-------|-------|-------|
| Normální rychlost smyčky | 0,14 | 4,94 | 4,03 |



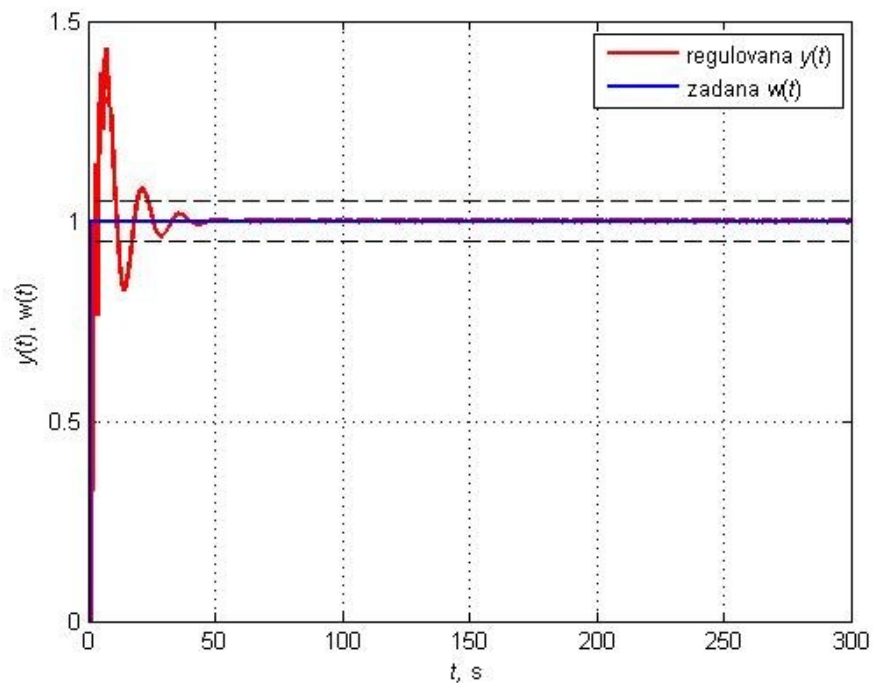
Obrázek 8.5 – Regulační průběh regulátoru KS/90-1, seřízení pomocí PMA Tune – rychlá rychlost smyčky

Tabulka 8.12 – Kritéria kvality regulátoru KS/90-1, seřízení pomocí PMA Tune – rychlá rychlost smyčky

| PMA Tune | Hodnota ITAE | Hodnota ISE | Max. překmit, % | Doba odezvy, s | Přibližná doba ustálení, s |
|------------------------|--------------|-------------|-----------------|----------------|----------------------------|
| Rychlá rychlost smyčky | 884,7 | 15,4 | 15,8 | 39,53 | 93,57 |

Tabulka 8.13 – Parametry regulátoru KS/90-1 získané pomocí PMA Tune – rychlá rychlost smyčky

| PMA Tune | r_0 | T_i | T_d |
|------------------------|-------|-------|-------|
| Rychlá rychlost smyčky | 0,21 | 3,30 | 2,69 |



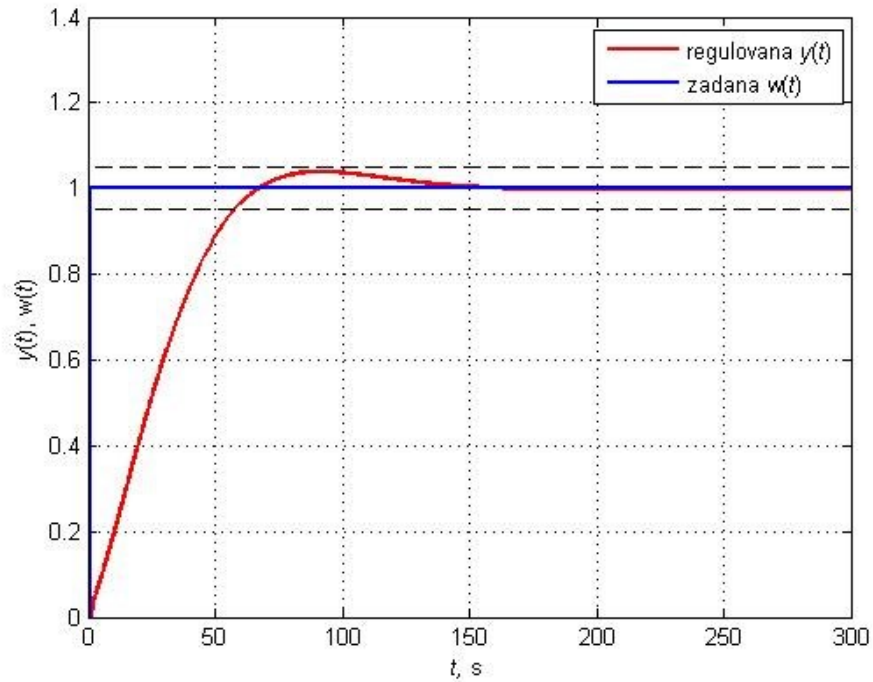
Obrázek 8.6 – Regulační průběh regulátoru KS/98-1, použití bloku CONTR

Tabulka 8.14 – Kritéria kvality regulátoru KS/98-1, použití bloku CONTR

| Prostředí SIM/KS98 | Hodnota ITAE | Hodnota ISE | Max. překmit, % | Doba odezvy, s | Přibližná doba ustálení, s |
|--------------------|--------------|-------------|-----------------|----------------|----------------------------|
| Blok CONTR | 56,04 | 1,73 | 43,2 | 2,68 | 23,76 |

Tabulka 8.15 – Parametry regulátoru KS/98-1, použití bloku CONTR

| Prostředí SIM/KS98 | r_0 | T_i | T_d |
|--------------------|-------|-------|-------|
| Blok CONTR | 8,40 | 1,50 | 1,50 |



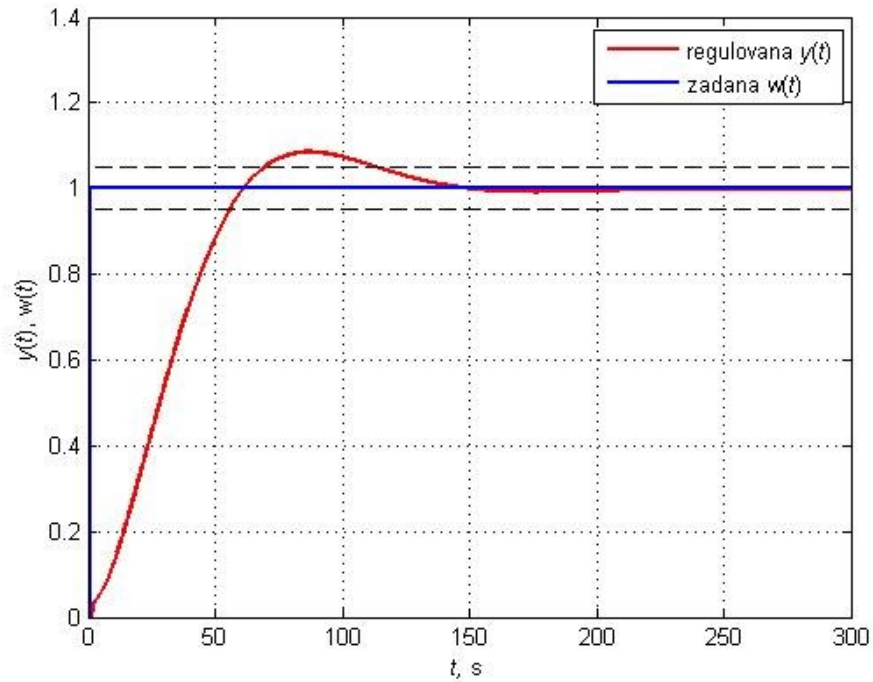
Obrázek 8.7 – Regulační průběh regulátoru KS/98-1, použití bloku PIDMA

Tabulka 8.16 – Kritéria kvality regulátoru KS/98-1, použití bloku PIDMA

| Prostředí SIM/KS98 | Hodnota ITAE | Hodnota ISE | Max. překmit, % | Doba odezvy, s | Přibližná doba ustálení, s |
|--------------------|--------------|-------------|-----------------|----------------|----------------------------|
| Blok PIDMA | 714,9 | 16,2 | 3,93 | 57,68 | 57,68 |

Tabulka 8.17 – Parametry regulátoru KS/98-1, použití bloku PIDMA

| Prostředí SIM/KS98 | r_0 | T_i | T_d |
|--------------------|-------|-------|-------|
| Blok PIDMA | 0,38 | 9,10 | 1,80 |



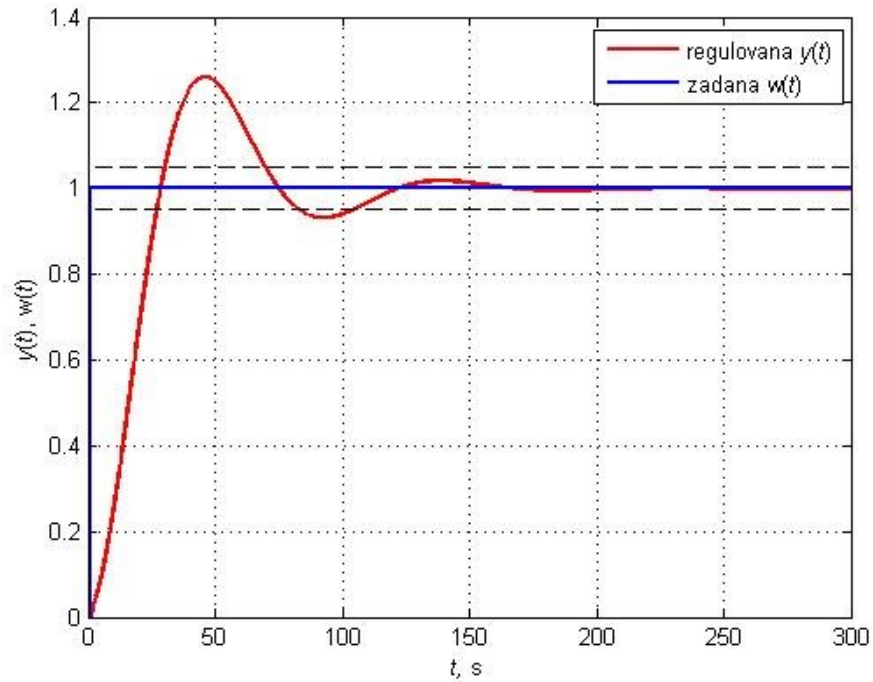
Obrázek 8.8 – Regulační průběh regulátoru KS/98-1, seřízení pomocí PMA Tune – normální rychlost smyčky

Tabulka 8.18 – Kritéria kvality regulátoru KS/98-1, seřízení pomocí PMA Tune – normální rychlost smyčky

| PMA Tune | Hodnota ITAE | Hodnota ISE | Max. překmit, % | Doba odezvy, s | Přibližná doba ustálení, s |
|--------------------------|--------------|-------------|-----------------|----------------|----------------------------|
| Normální rychlost smyčky | 1016 | 19,41 | 8,5 | 55,67 | 113,6 |

Tabulka 8.19 – Parametry regulátoru KS/98-1, získané pomocí PMA Tune – normální rychlost smyčky

| PMA Tune | r_0 | T_i | T_d |
|--------------------------|-------|-------|-------|
| Normální rychlost smyčky | 0,17 | 4,12 | 3,37 |



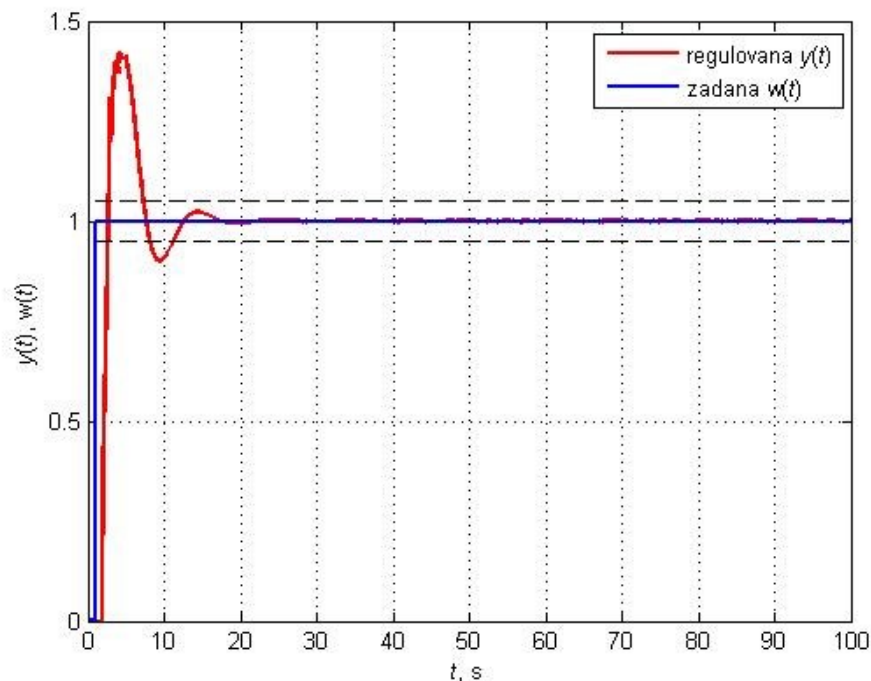
Obrázek 8.9 – Regulační průběh regulátoru KS/98-1, seřízení pomocí PMA Tune – rychlá rychlost smyčky

Tabulka 8.20 – Kritéria kvality regulátoru KS/98-1, seřízení pomocí PMA Tune – rychlá rychlost smyčky

| PMA Tune | Hodnota ITAE | Hodnota ISE | Max. překmit, % | Doba odezvy, s | Přibližná doba ustálení, s |
|------------------------|--------------|-------------|-----------------|----------------|----------------------------|
| Rychlá rychlost smyčky | 884,7 | 15,4 | 15,8 | 39,53 | 93,57 |

Tabulka 8.21 – Parametry regulátoru KS/98-1, získané pomocí PMA Tune – rychlá rychlost smyčky

| PMA Tune | r_0 | T_i | T_d |
|------------------------|-------|-------|-------|
| Rychlá rychlost smyčky | 0,28 | 2,54 | 2,08 |



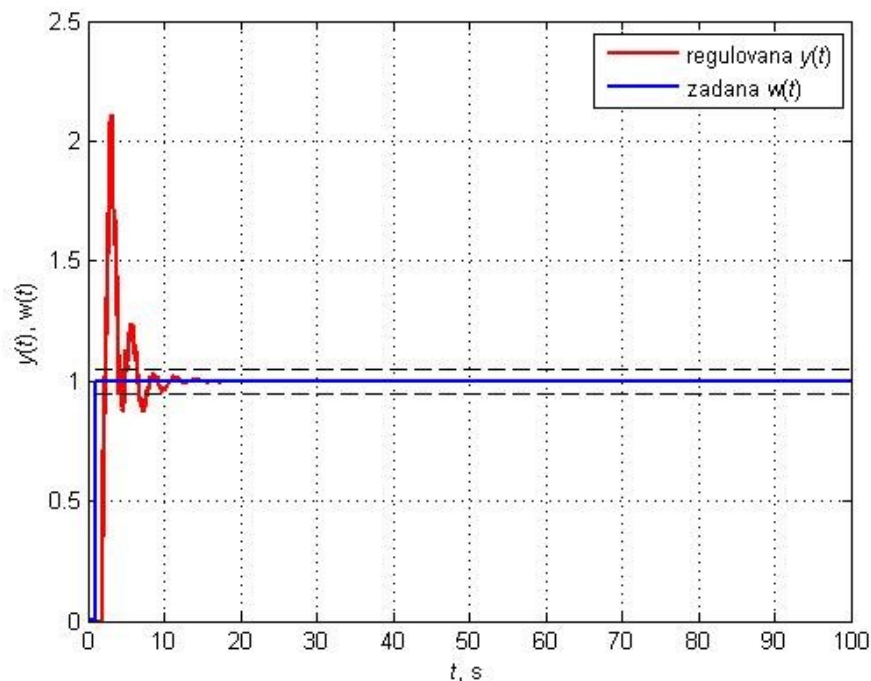
Obrázek 8.10 – Regulační průběh při seřízení pomocí relé ve zpětné vazbě

Tabulka 8.22 – Kritéria kvality regulátoru při seřízení pomocí relé ve zpětné vazbě

| MATLAB | Hodnota ITAE | Hodnota ISE | Max. překmit, % | Doba odezvy, s | Přibližná doba ustálení, s |
|----------------------|--------------|-------------|-----------------|----------------|----------------------------|
| Relé ve zpětné vazbě | 13,45 | 1,58 | 42,03 | 2,68 | 11,2 |

Tabulka 8.23 – Parametry regulátoru získané pomocí relé ve zpětné vazbě

| MATLAB | r_0 | T_i | T_d |
|----------------------|-------|-------|-------|
| Relé ve zpětné vazbě | 15,66 | 1,95 | 0,49 |



Obrázek 8.11 – Regulační průběh při seřízení z průběhu přechodové charakteristiky

Tabulka 8.24 – Kritéria kvality regulátoru při seřízení z průběhu přechodové charakteristiky

| MATLAB | Hodnota ITAE | Hodnota ISE | Max. překmit, % | Doba odezvy, s | Přibližná doba ustálení, s |
|-----------------------------------|--------------|-------------|-----------------|----------------|----------------------------|
| Pomocí přechodové charakteristiky | 9,71 | 1,72 | 111,02 | 2,27 | 7,74 |

Tabulka 8.25 – Parametry regulátoru získané při seřízení z průběhu přechodové charakteristiky

| MATLAB | r_0 | T_i | T_d |
|----------------------------|-------|-------|-------|
| přechodové charakteristiky | 25 | 2 | 0,5 |

9 Závěr

Tato diplomová práce byla věnována problematice týkající se samočinného nastavování parametrů průmyslových regulátorů. V práci byly detailně popsány metody samočinného nastavení běžně využívané firmami, např. Honeywell, Yokogava, ABB, PMA, nebo Foxboro. V závěru práce bylo provedeno porovnání a zhodnocení kvalitativních výsledků, kterých jednotlivé metody dosahují.

Práce byla rozdělena na teoretickou a praktickou část, ovšem obě části se do značné míry vzájemně prolínají. V prvních dvou kapitolách byl uveden teoretický úvod do automatického řízení, kde byly popsány vlastnosti spojitého a číslicového regulátoru. Třetí kapitola byla zaměřena na specifikaci průmyslových regulátorů. Ve čtvrté kapitole byl popsán proces auto-tuningu a v čem se liší jednorázová optimalizace od adaptivního řízení. Bylo zde uvedeno pořadí jednotlivých kroků auto-tuningu. Pátá kapitola byla zaměřena na metody využívané výrobcí průmyslových regulátorů. V poslední teoretické kapitole bylo provedeno vyhodnocení regulačních pochodů.

V praktické části bylo využito průmyslových regulátorů KS/90-1 a KS/98-1 od německé firmy PMA, na kterých byly provedeny ve školních laboratořích experimenty samočinného nastavení regulátoru. V případě KS/98-1 se jedná o plně programovatelný regulátor, který je uzpůsoben pro řízení technologických procesů. Dále byl využit inženýrský program PMA Tune, který nabízí vyhovující výsledky regulačních pochodů i u procesů s dominantním dopravním zpožděním. V prostřední MATLAB & SIMULINK byly napsány dva algoritmy pro samočinně se nastavující PID regulátory. Tyto algoritmy využívají Ziegler-Nicholsových vztahů. První algoritmus využívá k výpočtu parametrů regulátoru přechodovou charakteristiku a druhý vychází z kritických kmitů. V závěru práce byl v MATLABU vytvořen model, který umožnil vyhodnotit a simulačně ověřit nalezené parametry získané pomocí průmyslových regulátorů společně s algoritmy vytvořenými v MATLABU.

Nelze jednoznačně a objektivně stanovit, která z metod nejlépe nalezne optimální parametry regulátoru. Každý technologický proces si vyžaduje jiný regulační děj. Vždy je jistý poměr mezi maximální hodnotou překmitu a dobou odezvy. Za částečně objektivní stanovisko lze považovat plochu regulační odchylky, kde menší plocha zaručuje lepší přiblížení k ideální regulaci. Výsledky z prostředí PMA Tune jsou směřovány na minimální regulační překmit, z tohoto důvodu je o něco delší doba odezvy než nabízí metody v prostředí BlueControl Expert, kde regulační překmit přesahuje přes 30 %. Výrazně lepší výsledky nabízí regulátor KS/98-1, který byl simulován v prostředí SIM/KS98. Zde je poměr mezi


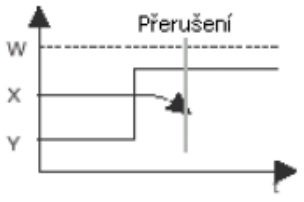
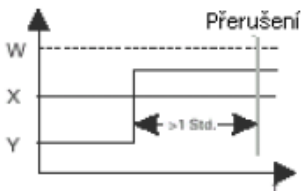
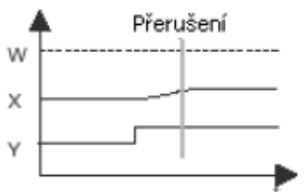
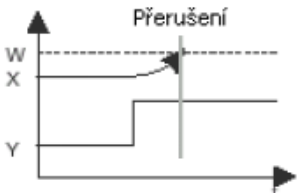
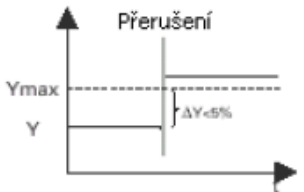
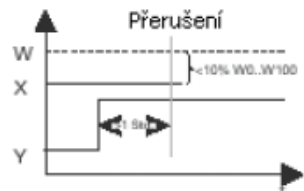
maximálním překmitem a dobou odezvy o něco lepší, než u regulátoru KS/90-1. Výsledky dvou metod realizované v programu MATLAB, kde se parametry nastavovaly pomocí Ziegler-Nicholsových vztahů, nabízely velmi nízkou hodnotu plochy regulační odchylky, ovšem za cenu několikrát vyššího překmitu než u metod předešlých. Z celkového vyhodnocení lze říci, že lepších výsledků regulačních pochodů dosahují metody implementované v regulátoru KS/98-1.

Literatura

- ÅSTRÖM, K.; HÄGGLUND, T. 1995. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. Research Triangle Park (USA): Instrument Society of America. 343 p. ISBN 1-55617-516-7
- BALÁTĚ, J. 2004. *Automatické řízení*. Praha: Nakladatelství BEN – technická literatura. 664 s. ISBN 80-7300-148-9
- BLAHA, P.; VAVŘÍN, P. 2009. *Řízení a regulace I. Základy regulace lineárních systémů - spojité a diskrétní*. [on line]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. 213 s. [cit. 19. 2. 2014]. Dostupné na http://www.uamt.feec.vutbr.cz/~richter/vyuka/0809_BRR1/texty/brr1.pdf
- BOBÁL, V.; BÖHM, J. 2005. *Digital Self-tuning Controllers: Algorithms, Implementation and Application*. London: Springer. 317 p. ISBN 1-85233-980-2
- HLAVA, J. 2000. *Prostředky automatického řízení II*. [on line]. Praha: Technická Univerzita Liberec. 162 s. [cit. 15. 11. 2013]. Dostupné na http://www.fm.tul.cz/~jaroslav.hlava/par/Skripta_PAR.pdf
- HLAVA, J. 2011. *Samočinné nastavování PID regulátorů*. [on line]. Liberec: Technická univerzita Liberec, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií. 16 s. [cit. 15. 3. 2014]. Dostupné na <http://www.fm.tul.cz/esf0247/index.php?download=684>
- HYNIOVÁ, K. 2011. *Číslicové regulátory*. [on line]. Praha: České vysoké učení technické. [cit. 10. 03. 2014]. Dostupné na https://edux.fit.cvut.cz/oppa/MI-ZRS/cviceni/CVICENI_8_cislicove_regulatory.pdf
- KLÁN, P. 2000. *Moderní metody nastavení PID regulátorů*. Automa. Roč. 2000, č. 09, s. 54-57. [on line]. Praha: Ústav informatiky AV ČR. [cit. 28. 4. 2014]. Dostupné na <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au090054.pdf>
- KLÁN, P. 2009. *Komerční využívané pokročilé metody nastavování PID regulátorů*. Automa. Roč. 15, č. 12 (2009), s. 14-18. [on line]. Praha: Ústav informatiky AV ČR. [cit. 31. 3. 2013]. ISSN 1210-9592. Dostupné na http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=40134
- KOCIÁN, J. 2009. *Samonastavitelné regulátory v prostředí PLC*. Diplomová práce. Ostrava: Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky. 59 s.
- KORBEL J. 2011. *Metody pro automatické nastavování a ladění parametrů spojitéch regulátorů*. Disertační práce. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. 101 s.
- KUPKA, L. 2008. *Matlab & Simulink*. [on line]. Liberec: Technická univerzita Liberec, Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií. 224 s. [cit. 15. 11. 2013]. Dostupné na <http://www.mti.tul.cz/files/zky/MATLABaSimulink.pdf>

- PMA. 2012. *Single Loop Controller*. [on line]. [cit. 22. 04. 2014]. Dostupné na <http://www.west-cs.de/produkte/#search>
- PROFESS spol. s.r.o.. 2006. *Multifunkční regulátor KS 98-1, Příručka uživatele*. [on line]. Plzeň. 234 s. [cit. 20. 3. 2014]. Dostupné na <http://www.profess.cz/dynamic/produkty/dokument/KS98-1N.pdf>
- PROFESS spol. s.r.o.. 2011a. *KS 90-1 / KS 92-1, Průmyslové procesní regulátory*. [on line]. Plzeň. 8 s. [cit. 22. 4. 2014]. Dostupné na <http://www.profess.cz/dynamic/produkty/dokument/KS90-1.pdf>
- PROFESS spol. s.r.o.. 2011b. *KS 98-1, Multifunkční regulátor*. [on line]. Plzeň. 12 s. [cit. 22. 4. 2014]. Dostupné na <http://www.profess.cz/dynamic/produkty/dokument/KS98-1.pdf>
- PROFESS spol. s.r.o.. 2011c. *Průmyslové regulátory KS 90-1 a KS 92-1, Návod k použití*. [on line]. Plzeň. 76 s. [cit. 15. 4. 2014]. Dostupné na <http://www.profess.cz/dynamic/produkty/dokument/KS90-1N.pdf>
- REX CONTROLS. 2003. *Program pro automatické nastavování PID regulátorů: PMATune*. 25 s.
- SCHLEGEL, M. 2003. *Průmyslové PID regulátory: tutorial*. [on line]. REX Controls s.r.o. [cit. 10. 03. 2014]. Dostupné na http://matlab.fei.tuke.sk/raui/doc/PIDTutor_CZ.pdf
- ŠČEVÍK, P. 2008. *Číslicová regulace*. [on line]. Ostrava: Technická Univerzita Ostrava. [cit. 10. 04. 2014]. Dostupné na <http://books.fs.vsb.cz/cislicovaregulace/>
- VÁVRA, P. 2010. *Průmyslový regulátor pid s autotunerem a vizualizací*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. 76 s.
- VÍTEČKOVÁ, M.; VÍTEČEK, A. 2010. *Plant identification by relay method*. [on line]. Research Ostrava: Technická Univerzita Ostrava. 17 s. [cit. 10. 5. 2014]. Dostupné na <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/12370.pdf>

PŘÍLOHA A – Význam optimalizačních kódů [PROFESS, 2006]

| ORes1/2 | Význam, příčina závady | Možnosti nápravy |
|---------|--|--|
| 0 | Samooptimalizace nebyla ještě vůbec provedena nebo byla přerušena povelom Stat: Stop nebo tlačítkem  . | |
| 1 | Přerušení: Špatný směr působení akční veličiny. X se nemění ve směru k W.  | Změnit smysl působení regulátoru |
| 2 | Ukončení: Samooptimalizace úspěšně proběhla (inflexní bod přechodové charakteristiky nalezen, regulační parametry bezpečně stanoveny) | |
| 3 | Přerušení: Regulovaná veličina nereaguje nebo je změna velmi pomalá (změna ΔX menší než 1%/hod.).  | Ověřit regulační obvod |
| 4 | Ukončení bez AdaErr: Úspěšný pokus, inflexní bod leží velmi nízko). | Nejllepší možný výsledek při nízkém infl. bodu. |
| | Přerušení s AdaErr: Úspěšný pokus, nedostatečná reakce (inflexní bod nalezen, stanovení parametrů ale nejisté)  | Zvětšit skok akční veličiny dY_{Opt} . |
| 5 | Přerušení: Samooptimalizace přerušena z důvodu nebezpečí překročení žádané hodnoty.  | Zvětšit odstup mezi X a W nebo snížit Y_{OptM} . |
| 6 | Ukončení: Úspěšný pokus, optimalizace ukončena z důvodu nebezpečí překročení žádané hodnoty (inflexní bod nenalezen, ale parametry s jistotou stanoveny). | |
| 7 | Přerušení: Nedostatečný skok $\Delta Y < 5\%$  | Zvětšit Y_{Max} nebo snížit Y_{OptM} . |
| 8 | Přerušení: Rezerva žádané hodnoty příliš malá nebo překročení žádané hodnoty během detekce ustáleného procesu.  | Změnit Y_{OptM} . |

PŘÍLOHA B – Obsah CD

| | |
|-----------------|--|
| Diplomová práce | elektronická verze dokumentu v pdf |
| Matlab | zdrojové skripty pro vykreslení regulačních pochodů |
| | zdrojové skripty pro výpočet parametrů pomocí přechodového děje |
| | zdrojové skripty pro výpočet parametrů pomocí relé ve zpětné vazbě |