

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

SAMOČINNÉ NASTAVOVÁNÍ PARAMETRŮ REGULÁTORŮ
KS 90-1 A KS 98-1

Tomáš Pácal

Bakalářská práce
2020

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Tomáš Pácal**
Osobní číslo: **I17076**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Řízení procesů**
Téma práce: **Samočinné nastavování parametrů regulátorů KS 90-1 a KS 98-1**
Zadávací katedra: **Katedra řízení procesů**

Zásady pro vypracování

Cílem práce je rozbor metod samočinného nastavování parametrů PID regulátoru používaných u vybraných regulátorů firmy PMA. Konkrétně bude práce zaměřena na regulátory KS 90-1 a KS 98-1, které jsou k dispozici v laboratoři. Sledovány budou způsoby získání popisu řízeného procesu, možnosti specifikace cílů řízení uživatelem (definice rychlosti odezvy, velikosti překmitu apod.) a použité techniky výpočtu parametrů regulátoru. V praktické části budou vybrané metody testovány s využitím specializovaného softwaru na regulátorech PMA. Teoretická část: Rešerše problematiky týkající se multifunkčních průmyslových regulátorů. Stručný přehled metod samočinného nastavování PID regulátorů používaných v průmyslové regulaci. Implementační část: 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 pracovní zprávy: **cca 50 stran**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- BOBÁL, V.; BÖHM, J.; FESSL, J.; MACHÁČEK, J. 2005. Digital Self-tuning Controllers: Algorithms, Implementation and Application. Londýn: Springer. 317 s. ISBN 978-1-85233-980-7.
- ASTRÖM, K.; HÄGGLUND, T. 1995. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. 2 vyd. Research Triangle Park (USA): Instrument Society of America. 343 s. ISBN 1-55617-516-7.
- HLAVA, J. 2000. Prostředky automatického řízení II: analogové a číslicové regulátory, elektrické pohony, průmyslové komunikační systémy. Praha: ČVUT. 160 s. ISBN 80-01-02221-8.
- KLÁN, P. 2009. Komerčně využívané pokročilé metody nastavování PID regulátorů. Automa, ročník 15 (2009), č. 12, s. 14 – 18. ISSN 1210-9592.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Libor Kupka, Ph.D.**
Katedra řízení procesů

Datum zadání bakalářské práce: **17. prosince 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **7. května 2020**



L.S.

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
děkan

Ing. Daniel Honc, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji:

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

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

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

V Pardubicích dne 18.8.2020

Tomáš Pácal

Poděkování

Úvodem bych rád poděkoval za poskytnuté materiály vedoucímu práce Ing. Liborovi Kupkovi, Ph.D. Dále jsem vděčný za předané vědomosti od všech učitelů v průběhu bakalářského studia. Nemohu nezmínit obrovskou podporu rodiny a přátel, bez které bych se ke studiu na vysoké škole nezvládl.

V Pardubicích dne 18.8.2020

Tomáš Pácal

ANOTACE

Práce je zaměřena na praktické využití samočinného nastavování PID regulátorů firmy PMA. Konkrétně je práce zaměřena na regulátory KS 90-1 a KS 98-1. Provedení experimentů s regulátorem KS 90-1 je v simulačním prostředí BlueControl Expert a aplikace PMA Tune. Následná softwarová implementace řídicích algoritmů v prostředí ET/KS98, je simulována v prostředí SIM/KS98 s regulátorem KS 98-1.

KLÍČOVÁ SLOVA

Regulátor, Regulace, Samonastavovací, Regulační obvod

TITLE

SELF-ADJUSTING PARAMETERS OF KS 90-1 AND KS 98-1 CONTROLLERS

ANNOTATION

The work is focused on practical on of self-adjusting PID regulators of company PMA. The work is pecifically focused on regulators KS 90-1 and KS 98-1. Execution with regulator KS 90-1 was done in simulation environment of BlueControl Expert and application PMA Tune. Following software implementation of control algorithms in environment ET/KS98, was simulated in environment SIM/KS98 and regulator KS 98-1.

KEYWORDS

Controller, regulation, Self-tunning, Control circuit

OBSAH

	SEZNAM ZKRATEK	9
	SEZNAM SYMOBLŮ VELIČIN A FUNKCÍ	10
	SEZNAM ILUSTRACÍ	11
	SEZNAM TABULEK	13
	ÚVOD	14
1	ŘÍZENÍ PROCESŮ	15
2	REGULAČNÍ OBVOD	16
2.1	Laplaceova transformace	17
2.2	Regulovaná soustava	17
2.2.1	Popis vlastností regulované soustavy	18
2.3	Regulátor	20
3	PID REGULÁTORY	21
3.1	Proporcionální složka P	21
3.2	Integrační složka I	21
3.3	Derivační složka D	22
3.4	Tvary PID regulátorů	22
4	DIGITÁLNÍ REGULÁTORY	26
4.1	PSD regulátory	27
5	PRŮMYSLOVÉ REGULÁTORY	30
5.1	KS 90-1	30
5.2	KS 98-1	31
6	SAMOČINNÉ NASTAVENÍ PARAMETRŮ	33
6.1	Metoda optimálního modulu	33
6.2	Metoda limitního cyklu	34
6.3	Metoda založená na reakci na skokovou změnu akční veličiny	34
6.4	Metody využívané v regulátoru KS 90-1	35
6.5	Metody využívané v regulátoru KS 98-1	36
6.5.1	Funkční bloky COUNTR a COUNTR+	37
6.5.2	Funkční blok PIMDA	39
7	SIMULACE REGULÁTORŮ FIRMY PMA	40
7.1	BlueControl Expert	40
7.2	PMA Tune	44

8	VYHODNOCENÍ SIMULACÍ	49
	ZÁVĚR	59
	LITERATURA	60

SEZNAM ZKRATEK

A/D převodník	analogově digitální převodník
CAN	controller area network
D/A převodník	digitálně analogový převodník
DIN	deutsches institut für normung, německý institut pro normalizaci
EEPROM	electrically Erasable programmable read-only memory
LCD	liquid crystal display
L-transformace	Laplaceova transformace
ORO	otevřený regulační obvod
PID regulátor	proporcionální-integrační-derivační regulátor
PiR	process at rest
PSD regulátor	proporcionálně-sumačně-diferenční regulátor

SEZNAM SYMOBLŮ VELIČIN A FUNKCÍ

α	reálná složka operátoru
$\delta(t)$	funkce Diracova impulzu
$\eta(t)$	funkce jednotkového skoku
τ_M	časová konstanta
ω	imaginární složka operátoru
A	amplituda výstupního signálu
A	matice systému
B	matice řízení
C	matice závislosti stavu na výstupu
D	dopravní zpoždění
D	matice závislosti vstupu na výstupu
$e(t)$	regulační odchylka
$F(s)$	obraz přenosu regulovaného obvodu
M	amplituda na výstupu reléové nelinearity
$R(s)$	obraz signálu regulátoru
r_0	proporcionální složka
r_1	integrační složka
r_2	derivační složka
s	operátor
T	doba cyklu
T_D	derivační časová konstanta
T_I	integrační časová konstanta
T_n	doba náběhu
T_u	doba průtahu
u	vstupní vektor
$u(t)$	akční zásah
$w(t)$	žádaná hodnota
x	stavový vektor
\dot{x}	následující stav soustavy
y	výstupní vektor
$y(t)$	výstupní hodnota

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obrázek 2.1 – Dopředné řízení	16
Obrázek 2.2 – Uzavřený regulační obvod	16
Obrázek 2.3 – Stavový model soustavy	19
Obrázek 2.4 – Impulzní a přechová charakteristika	20
Obrázek 3.1 – Standartní tvar PID regulátoru	23
Obrázek 3.2 – Sériový tvar PID regulátoru (Åström, 1995)	24
Obrázek 3.1 – Paralelní tvar PID regulátoru	24
Obrázek 4.1 – Struktura digitálního regulátoru (Hlava, 2000)	26
Obrázek 4.2 – Metody výpočtu sumační složky (Bobál, 2005)	28
Obrázek 5.1 – Regulátor 90-1(PMA, 2012)	31
Obrázek 5.2 – Regulátor 98-1 (PMA, 2012)	31
Obrázek 6.1 – Zapojení pro metodu limitního cyklu (Åström, 1995)	34
Obrázek 6.2 – Ručně spuštěná samooptimalizace bloku COUNTR (Profess, 2006)	37
Obrázek 6.3 – Průběh samooptimalizace bloku COUNTR (Profess, 2006)	38
Obrázek 6.4 – Automatická samooptimalizace bloku COUNTR (Profess, 2006)	38
Obrázek 6.5 – Samooptimalizace bloku PIDMA (Profess, 2006)	39
Obrázek 7.1 – Prostředí BlueControl Expert	40
Obrázek 7.2 – Průběh samooptimalizace regulátoru KS 90-1, metoda skokové funkce při startu	41
Obrázek 7.3 – Průběh samooptimalizace regulátoru KS 90-1, metoda skokové funkce při startu a impulzní funkce na žádané hodnotě	42
Obrázek 7.4 – Průběh samooptimalizace regulátoru KS 90-1, metoda impulzní funkce při startu a impulzní funkce na žádané hodnotě	43
Obrázek 7.5 – Průběh samooptimalizace regulátoru KS 98-1, samooptimalizační algoritmus PMA Tune	44
Obrázek 7.6 – Použitelnost algoritmu PMA Tune (Profess, 2006)	45
Obrázek 7.7 – Prostředí SIM/KS98	46
Obrázek 7.8 – Prostředí ET/KS98	46
Obrázek 7.9 – Průběh samooptimalizace regulátoru KS 98-1, samooptimalizace funkčním blokem COUNTR	47
Obrázek 8.1 – Průběh regulace regulátoru KS 90-1 s odhadovanými parametry	49
Obrázek 8.2 – Průběh regulace regulátoru KS 90-1, metoda skokové funkce při startu	50

Obrázek 8.3 – Průběh regulace regulátoru KS 90-1, metoda skokové funkce při startu a impulzní funkce na žádané hodnotě	51
Obrázek 8.4 – Průběh regulace regulátoru KS 90-1, metoda impulzní funkce při startu a na žádané hodnotě	52
Obrázek 8.5 – Průběh regulace regulátoru KS 90-1, metody PMA Tune	53
Obrázek 8.6 – Průběh regulace regulátoru KS 98-1 s odhadovanými parametry	54
Obrázek 8.7 – Průběh regulace regulátoru KS 98-1, metoda funkčního bloku COUNTR	55
Obrázek 8.8 – Průběh regulace regulátoru KS 98-1, metoda funkčního bloku PIDMA	56
Obrázek 8.9 – Průběh regulace regulátoru KS 98-1, metody PMA Tune	57

SEZNAM TABULEK

Tab. 6.11 – Výběr regulačního algoritmu v bloku COUNTR [PROFESS, 2006]	33
Tab. 8.1 – Kritéria kvality regulátoru KS 90-1	45
Tab. 8.2 – Kritéria kvality regulátoru KS 98-1	45, 46
Tab. 8.3 – Kritéria kvality regulátoru KS 90-1 s odhadovanými parametry	46
Tab. 8.4 – Odhadované parametry regulátoru KS 90-1	46
Tab. 8.5 – Kritéria kvality regulátoru KS 90-1, metoda skokové funkce při startu	47
Tab. 8.6 – Parametry regulátoru KS 90-1, získané metodou skokové funkce při startu	47
Tab. 8.7 – Kritéria kvality regulátoru KS 90-1, metoda skokové funkce při startu a impulzní funkce na žádané hodnotě	48
Tab. 8.8 – Parametry regulátoru KS 90-1, získané metodou skokové funkce při startu a impulzní funkce na žádané hodnotě	48
Tab. 8.9 – Kritéria kvality regulátoru KS 90-1, metoda impulzní funkce při startu a na žádané hodnotě	49
Tab. 8.10 – Parametry regulátoru KS 90-1, získané metodou impulzní funkce při startu a na žádané hodnotě	49
Tab. 8.11 – Kritéria kvality regulátoru KS 90-1, metoda s využitím algoritmu PMA Tune ..	50
Tab. 8.12 – Parametry regulátoru KS 90-1, získané s využitím algoritmu PMA Tune	50
Tab. 8.13 – Kritéria kvality regulátoru KS 98-1 s odhadovanými parametry	51
Tab. 8.14 – Odhadované parametry regulátoru KS 98-1	51
Tab. 8.15 – Kritéria kvality regulátoru KS 98-1, metoda funkčního bloku COUNTR	52
Tab. 8.16 – Parametry regulátoru KS 98-1, získané metodou funkčního bloku COUNTR ...	52
Tab. 8.17 – Kritéria kvality regulátoru KS 98-1, metoda funkčního bloku PIDMA	53
Tab. 8.18 – Parametry regulátoru KS 98-1, získané metodou funkčního bloku PIDMA	53
Tab. 8.19 – Kritéria kvality regulátoru KS 98-1, metoda s využitím algoritmu PMA Tune ..	54
Tab. 8.20 – Parametry regulátoru KS 98-1, získané pomocí metod s využitím algoritmu PMA Tune	54

ÚVOD

Dnešní průmysl je propleten automatizací. Regulátory jsou velkou součástí dnešní i historické automatizace. Dnešním nejvyžívanějším regulátorem je PID regulátor. V počátcích jeho využívání se jeho složky nastavovaly většinou experimentálně, ale to se změnilo se vznikem souhrnu nastavujících pravidel, které v roce 1942 sepsali inženýři John G. Ziegler a Nathaniel B. Nichols.

S digitalizací přišla snaha o automatizování procesu nastavení parametrů regulátoru, aby nebylo nutné pro každý regulovaný obvod počítat jeho parametry. Regulátor tedy na povel operátora nebo před uvedením do provozu provede jednorázová nastavení. Tento proces je obsažen v každém průmyslovém regulátoru a každý výrobce používá svůj algoritmus.

1 ŘÍZENÍ PROCESŮ

Za řízení procesů je v automatizaci považováno řízení regulačního obvodu, tak aby akční zásah do regulačního obvodu, vyvolaný regulátorem, způsobil ideálně okamžité dosažení žádané hodnoty na výstupu regulované soustavy. Řízení takového procesu může být automatické nebo manuální. Manuálním řízení se rozumí nepřetržitý dozor operátora společně s jeho zásahem do řízeného systému. Automatické řízení je plně automatizováno regulátorem, tak aby nebyl potřeba nepřetržitý dozor.

V minulosti byly regulační obvody osazeny analogovými regulátory, které se skládaly z různě zapojených operačních zesilovačů. Moderní regulátory jsou díky pokroku v oblasti techniky dnes většinou v podobě mikroprocesoru společně s funkcemi jako samočinné nastavování parametrů, filtrace vstupních a výstupních signálů, ošetření mezních stavů nebo diagnostikami.

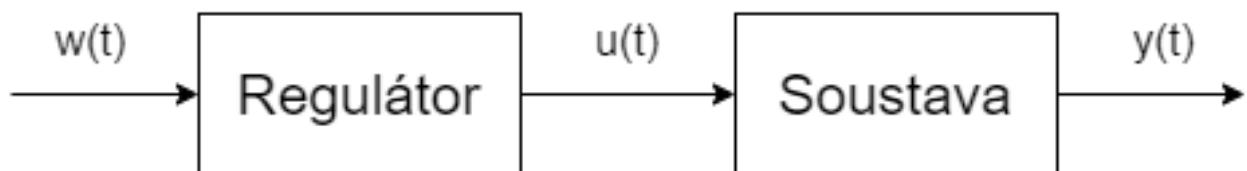
Cílem regulace je dosáhnout vstupní žádané fyzikální veličiny na výstupu za pomoci regulátoru, který volí správný zásah do regulované soustavy. U regulace sledujeme hlavně tyto vlastnosti:

- dobu trvání ustálení regulačního obvodu
- maximální překmit výstupní hodnoty vůči žádané hodnotě
- stabilitu celého regulačního obvodu.

2 REGULAČNÍ OBVOD

Řízení tedy dělíme na dopředné nebo s pomocí záporné zpětné vazby. S tímto souvisí pojmy otevřený regulační obvod ORO a uzavřený regulační obvod URO.

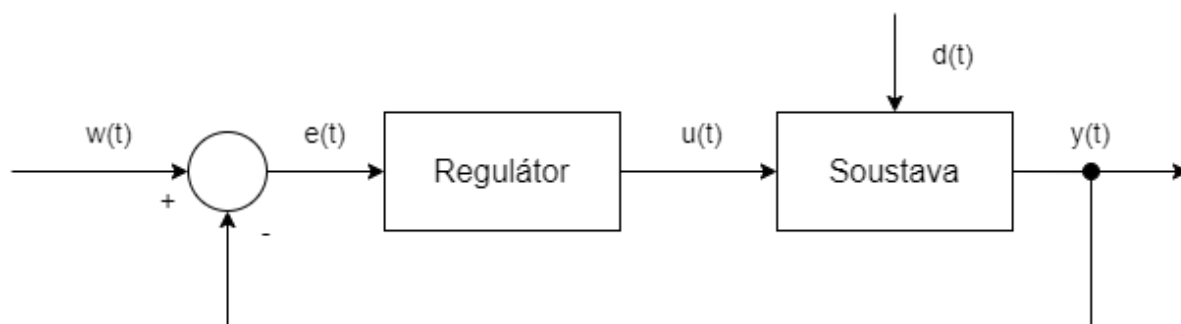
Otevřený regulační obvod je také nazýván dopředné řízení. Podle žádané hodnoty $w(t)$ je regulátorem pomocí předem stanoveného vzorce určen akční zásah $u(t)$ z regulátoru, který je nezávislý na výstupu z regulované soustavy $y(t)$, tento proces je vyobrazen na obrázku 2.1. Tímto způsobem regulační obvod pouze řídíme a nedostáváme žádnou informaci o stavu výstupu.



Obrázek 2.1 – Dopředné řízení

Uzavřený regulační obvod využívá zápornou zpětnou vazbu, která zajišťuje hodnotu výstupu soustavy. Díky informaci ze záporné zpětné vazby lze kompenzovat vnější vlivy prostředí na soustavu. Tyto nežádoucí vlivy se nazývají poruchy označované jako $d(t)$. Rozdílem žádané hodnoty $w(t)$ a výstupní hodnoty $y(t)$ se získá regulační odchylka $e(t)$. Přivedením regulační odchylky do regulátoru je zvolen akční zásah $u(t)$, kterým je následně regulována regulační soustava.

Regulátor se tedy snaží o dosažení žádané hodnoty na výstupu regulované soustavy. Regulátor minimalizuje regulační odchylku, i když na soustavu můžou působit předem nedefinované poruchy. Schéma uzavřené regulační smyčky je na obrázku 2.2 (Cvejn, 2007).



Obrázek 2.2 – Uzavřený regulační obvod

2.1 LAPLACEOVA TRANSFORMACE

Laplaceova transformace slouží jako nástroj pro popis chování složitějších spojitých obvodů. Pomocí Laplaceovy transformace lze výrazně ulehčit výpočty diferenciálních rovnic, přetřansformováním do algebraického tvaru. Laplaceova transformace časovou proměnnou t převede na komplexní proměnnou označovanou jako operátor s

$$s = \alpha + j\omega, \quad (2.1)$$

kde α je reálná složka,

ω je imaginární složka.

Funkce převedená do komplexní roviny se nazývá obraz a původní funkci nazýváme originálem. K převodu časových funkcí a zpět z komplexní funkce slouží slovník, ve kterém jsou zapsány odvozené převody funkcí. Poměrem obrazů výstupu ku vstupu při nulových podmínkách získáme obrazový přenos (Cvejn, 2007).

2.2 REGULOVANÁ SOUSTAVA

Regulovanou soustavou se nazývá soubor fyzikálních veličin, které jsou na objektu nebo soustavě objektů významné nebo zajímavé. Všechny zbývající objekty považujeme za okolí systému. Bez ohledu na rozdíl ve fyzikální povaze reálných objektů je možné systém analyzovat a matematicky s nimi pracovat stejným způsobem.

V regulované soustavě se rozlišují výstupní, vstupní a vnitřní veličiny. Vstupní veličiny ovlivňují hodnoty soustavy. V regulovaném obvodu se tato veličina nazývá akční zásah a je označována písmenem u . Vnitřní veličiny jsou ovlivňovány vstupními veličinami a mají vliv na veličiny výstupní, ale nemusí být měřitelné. Výstupní veličina je veličina, která je sledována a v regulovaném obvodu se označuje písmenem y .

2.2.1 Popis vlastností regulované soustavy

Matematický model lze získat modelováním, identifikací nebo simulací. Vyjádření pomocí známých částí vlastností regulovaného obvodu a známých vztahů mezi nimi se nazývá modelování. Identifikace se provádí pomocí naměřených hodnot na existující regulované soustavě (Cvejn, 2007).

Vstupně výstupní model je přímo vyjádřená závislost mezi vstupy a výstupy, obecně diferenciální rovnicí vyššího řádu a zapisuje se vzorcem

$$y^{(n)} + a_{n-1} \cdot y^{(n-1)} + \dots + a_1 \cdot \dot{y} + a_0 \cdot y = b_m \cdot u^{(m)} + \dots + b_1 \cdot \dot{u} + b_0 \cdot u, \quad (2.2)$$

kde y – výstupní veličina,
 $y^{(n)}$ – n -tá derivace výstupní veličiny,
 a_n – konstanty času výstupní veličiny,
 u – vstupní veličina,
 $u^{(m)}$ – m -tá derivace vstupní veličiny,
 b_m – konstanty času vstupní veličiny.

V tomto tvaru musí pro reálný regulační systém platit

$$m \leq n, \quad (2.3)$$

kde m je řád vstupní funkce,
 n je řád výstupní funkce.

Je nutné znát počáteční podmínky výstupní veličiny v čase $t = 0$. Pokud jsou vstupní veličiny v rovnici derivovány, musíme znát počáteční podmínky i pro vstupní veličiny (Cvejn, 2007).

Dále lze regulovanou soustavu popsat stavovým modelem. Stavový popis používá maticový zápis do dvou rovnic. První rovnice se nazývá stavová rovnice a druhá je rovnicí výstupní. Do regulované soustavy přivedený akční zásah je v tomto popisu označován vstupním vektorem u o rozměru r . Stavový vektor x o rozměru n popisuje vnitřní stavy regulovaného

systemu a výstupní veličiny popisuje výstupní vektor \mathbf{y} o rozměru m (Roubal, 2009). Rovnice modelu stavu a modelu výstupu jsou zapsány v následujících vzorcích

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}, \quad (2.4)$$

kde $\dot{\mathbf{x}}$ je následující stav soustavy,

\mathbf{A} je matice systému,

\mathbf{x} je stavový vektor,

\mathbf{B} je matice řízení,

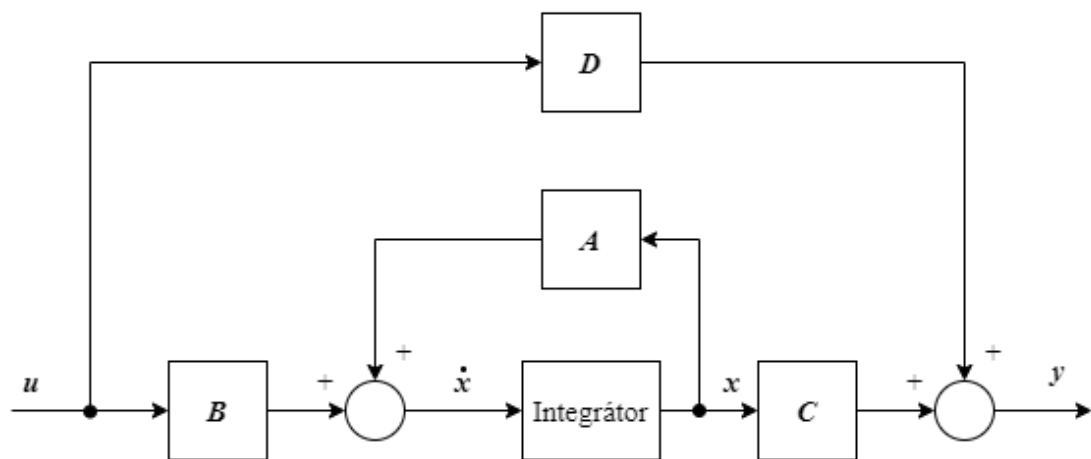
\mathbf{u} je vstupní vektor,

$$\mathbf{y} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{D} \cdot \mathbf{u}, \quad (2.5)$$

kde \mathbf{y} je výstupní vektor,

\mathbf{C} je matice závislosti stavu na výstupu,

\mathbf{D} je matice závislosti vstupu na výstupu.



Obrázek 2.3 – Stavový model soustavy

Další možností popisu vlastností regulované soustavy jsou přechodová a impulzní charakteristika. Tyto charakteristiky sledují reakci soustavy na předem definovaný signál v čase. Přechodová charakteristika je reakcí soustavy na jednotkový skok v nulovém čase, při nulových počátečních podmínkách a je matematicky definována takto

$$\eta(t) = 0 \text{ pro } t \in (-\infty, 0), \quad (2.6)$$

$$\eta(t) = 1 \text{ pro } t \in [0, \infty), \quad (2.7)$$

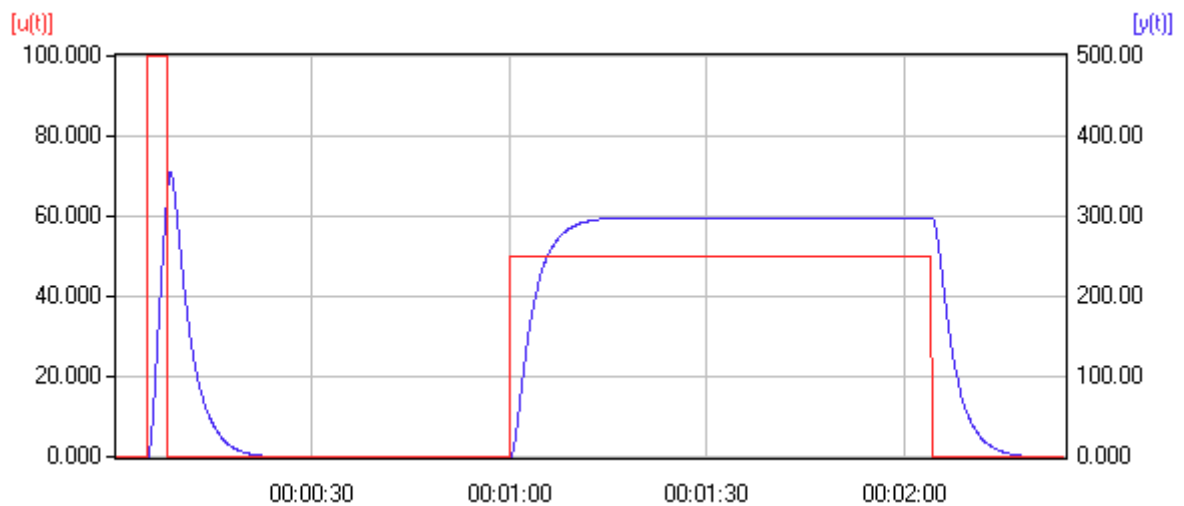
kde $\eta(t)$ je funkce jednotkového skoku.

Tato charakteristika je velmi často používaná v praxi, protože je snadno realizovatelná. Impulzní charakteristika je reakce soustavy na Diracův impulz. Diracův impulz je nekonečně velký signál, který trvá nekonečně krátkou dobu v nulovém čase, matematicky je definován následovně

$$\delta(t) = 0 \text{ pro } t \neq 0, \quad (2.8)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) = 1, \quad (2.9)$$

kde $\delta(t)$ je funkce Diracova impulzu.



Obrázek 2.4 – Impulzní a přechodová charakteristika

2.3 REGULÁTOR

Regulátor je část regulačního obvodu, která vyhodnocuje akční zásah do regulované soustavy. V uzavřeném regulačním obvodu je cílem regulátoru minimalizovat regulační odchylku, tedy ustálit výstupní veličinu na žádanou hodnotu pomocí zpětné vazby. Regulátory v otevřeném regulačním obvodu pracují pouze s predikcí a nemají zpětnou vazbu výstupu. Proto nemohou zjistit poruchu na výstupu a regulovaný obvod jen dopředu řídí (Cvejn, 2007).

3 PID REGULÁTORY

Regulátory se strukturou PID jsou regulátory spojitými, které se skládají ze tří složek. Složka P slouží k zesílení signálu a nazýváme jí složkou proporcionální. Druhou ze tří složek je integrační složka I, jejím cílem je minimalizovat regulační odchylku. Poslední složkou je derivační složka D, která urychluje regulační pochod a snižuje řád regulačního obvodu. Mimo strukturu PID se výjimečně používá struktur P, I, PI a PD. PID regulátory se dělí i podle struktury složek (Cvejn, 2007; Bobál, 2005).

3.1 PROPORCIONÁLNÍ SLOŽKA P

Pomocí proporcionální složky zesílujeme zpětnou vazbu regulačního obvodu a je označována jako r_0 . Zvyšováním hodnoty r_0 se urychluje regulační pochod, ale při vyšších hodnotách může nastat nestabilita celého regulovaného obvodu. Za nestabilní regulační obvod se považuje regulační obvod, jehož hodnota výstupního signálu kmitavě narůstá do nekonečna. Samotná proporcionální složka lze realizovat jako regulátor, ale nikdy neeliminuje regulační odchylku. K dosažení regulované odchylky je nutné přidat integrační složku (Cvejn, 2007; Bobál, 2005). Akční veličina proporcionální složky je vyjádřena vztahem

$$u(t) = r_0 \cdot e(t). \quad (3.1)$$

Obraz funkce je tedy vyjádřena vztahem

$$R(s) = r_0. \quad (3.2)$$

3.2 INTEGRAČNÍ SLOŽKA I

Integrační složka dokáže zcela eliminovat regulační odchylku, ale zpomaluje regulační pochod. Integrační složka je označována jako r_I a působí pouze, pokud je regulační odchylka nenulová. Nevýhodou integrační složky je zvýšení řádu soustavy. Akční veličina je dána vztahem

$$u(t) = r_I \cdot \int_0^t e(\tau) \cdot d(\tau). \quad (3.3)$$

Tvar obrazu funkce je popsána ve vzorci

$$R(s) = \frac{r_1}{s} = \frac{r_0}{T_I \cdot s}, \quad (3.4)$$

kde T_I je integrační časová konstanta.

Zmenšováním integrační časové konstanty se zrychluje regulační pochod, ale také se snižuje stabilita regulačního obvodu a zvyšuje se překmit.

3.3 DERIVAČNÍ SLOŽKA D

Derivační složka urychluje regulační pochod a snižuje řád přenosu. Při použití v regulačních obvodech s dopravním zpožděním urychluje reakci regulátoru. Akční zásah derivační složky r_2 lze vyjádřit vztahem

$$u(t) = r_2 \cdot \frac{de(t)}{dt}. \quad (3.5)$$

Obraz funkce je vyjádřena vztahem

$$R(s) = r_2 \cdot s = r_0 \cdot T_D \cdot s, \quad (3.6)$$

kde T_D je derivační časová konstanta.

Teoretický popis derivační složky je idealizován a v praktickém použití by způsoboval zkreslení signálu. Proto je derivační složka implementována pomocí filtru v podobě dolní propusti. Výhodou tohoto zapojení je odfiltrování vysokých frekvencí, které většinou odpovídají rušivým signálům (Cvejn, 2007; Bobál, 2005).

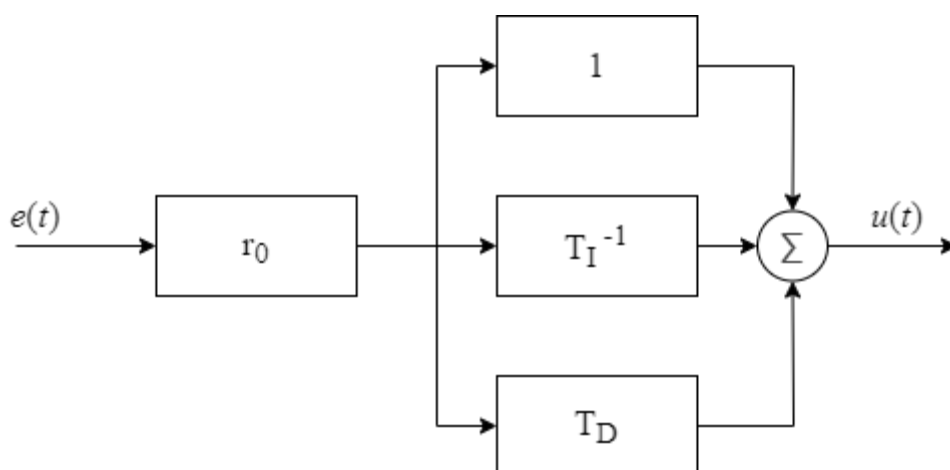
3.4 TVARY PID REGULÁTORŮ

Pro lepší využití potenciálu PID regulátorů než standartní tvar, který je na obrázku 3.1 a popsán vztahem 3.7, nahrazuje více optimálními tvary pro ovlivnění regulace regulovaného obvodu. Nejpoužívanější z těchto tvarů je tvar sériový, který se také nazývá interaktivní

$$u(t) = r_0 \cdot \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \cdot \int_0^t e(\tau) \cdot d(\tau) + T_D \cdot \frac{de(t)}{dt} \right]. \quad (3.7)$$

Obraz této funkce je

$$R(s) = r_0 \cdot \left[1 + \frac{1}{T_I' \cdot s} + T_D' \cdot s \right]. \quad (3.8)$$



Obrázek 3.1 – Standardní tvar PID regulátoru

Interaktivní sériový tvar je nepoužívanějším, protože jeho složky jsou vzájemně provázány a působí na sebe navzájem. To znamená, že na rozdíl od standardního tvaru PID regulátoru, integrační složka působí na derivační a naopak (Bobál, 2005). Výsledný vztah sériového zapojení je

$$u'(t) = r'_0 \cdot \left[e(t) + \frac{1}{T_I'} \int_0^t e(\tau) \cdot d(\tau) \right] \cdot \left[e(t) + T_D' \cdot \frac{de(t)}{dt} \right]. \quad (3.9)$$

Obraz přenosu regulátoru je vyjádřen vztahem

$$R'(s) = r'_0 \cdot \left(1 + \frac{1}{T_I' \cdot s} \right) \cdot (1 + T_D' \cdot s). \quad (3.10)$$

Pro přepočítání parametrů ze sériového tvaru do tvaru standardního se používají následující rovnice

$$r_0 = r'_0 \cdot \frac{T_I' + T_D'}{T_I'}, \quad (3.11)$$

$$T_I = T_I' + T_D', \quad (3.12)$$

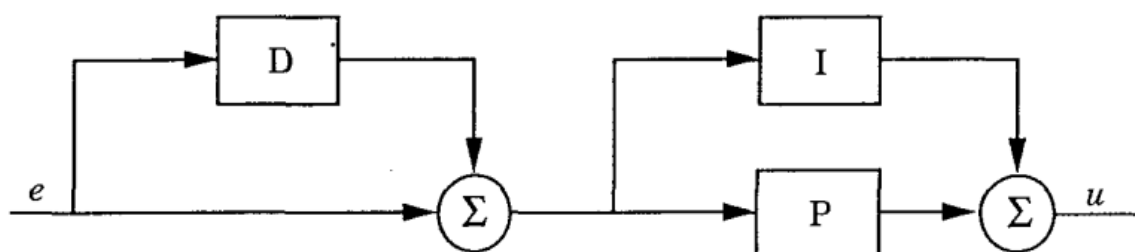
$$T_D = \frac{T_I' \cdot T_D'}{T_I' + T_D'}. \quad (3.13)$$

Parametry standardního tvaru na tvar sériový se dají přepočítat pouze za podmínky, že integrační konstanta je rovna nebo čtyřikrát větší než derivační časová konstanta (Bobál, 2005). Po splnění této podmínky platí přepočítací vztahy uvedeny v těchto vzorcích

$$r'_0 = \frac{r_0}{2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4 \cdot T_D'}{T_I'}} \right), \quad (3.14)$$

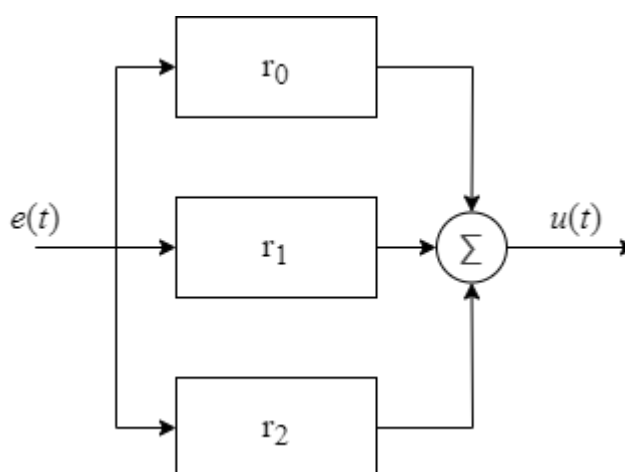
$$T_I' = \frac{T_I}{2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4 \cdot T_D'}{T_I'}} \right), \quad (3.15)$$

$$T_D' = \frac{T_D}{2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4 \cdot T_D'}{T_I'}} \right). \quad (3.16)$$



Obrázek 3.2 – Sériový tvar PID regulátoru (Åström, 1995)

Paralelní tvar PID regulátoru je na obrázku 3.3 a ze tří zmíněných je nejméně používaný. Stejně jako u standardního tvaru se jeho parametry navzájem neovlivňují.



Obrázek 3.3 – Paralelní tvar PID regulátoru

Paralelní tvar PID regulátoru je popsán vzorcem

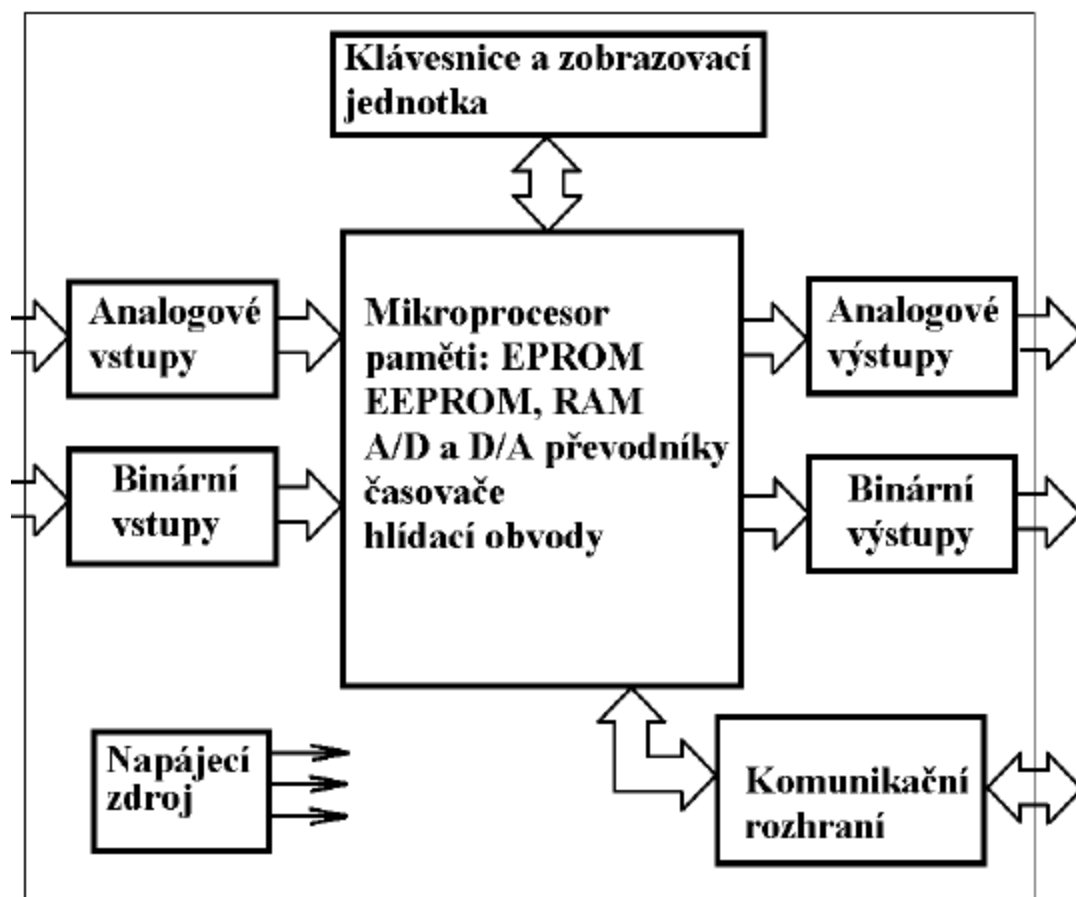
$$u(t) = r_0 \cdot e(t) + r_1 \cdot \int_0^t e(\tau) \cdot d(\tau) + r_2 \cdot \frac{de(t)}{dt}. \quad (3.17)$$

Obraz funkce přenosu je dán vzorcem

$$R(s) = r_0 + \frac{r_1}{s} + r_2 \cdot s. \quad (3.18)$$

4 DIGITÁLNÍ REGULÁTORY

Příchodem digitalizace se spojité regulátory začaly přetvářet v digitální. Digitální regulátory lze chápat jako regulátory spojité, které jsou místo diferenciálních rovnic popsány rovnicemi diferenčními. K převodu časové funkce na diferenční funkci se používá Z-transformace. Digitální regulátory musí být vybaveny převodními prvky pro úpravu signálu. Digitalizace signálu znamená ztrátu dat při převodu. Struktura digitálního regulátoru je na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1 – Struktura digitálního regulátoru (Hlava, 2000)

Digitální regulátory jsou většinou v podobě jednočipových mikropočítačů s integrovanou pamětí, A/D a D/A převodníky a dalšími periferiemi. Paměť mikropočítačů může být v podobě EPROM, EEPROM, FLASH atd. Tyto paměti mohou být použité pro uložení samotného programu regulátoru nebo pro uchování proměnných. Pro přijímání analogového signálu jsou mikropočítače vybaveny A/D převodníky a pro akční zásah v podobě analogového signálu D/A převodníky. Každý A/D převodník aproximuje analogový signál do digitální podoby s určitou chybou, kterou lze zmenšit rychlejší frekvencí vzorkovacích obvodů

převodníku. Převodníky využívají časové základny pro správnou funkci. Zdroje časové základny mohou být obsaženy přímo v mikropočítači a může jím být oscilátor v podobě krystalu.

Mikropočítač většinou pracuje s logikou proudových signálů 4 až 20 mA, při které je lehčí zjistit poruchu na vedení. Dále se využívá napět'ových asymetrických signálů 0 až 5 V nebo symetrických -5 až 5 V.

Hrozbu zacyklení programu kontroluje vnitřní modul nazývaný „Watchdog“, který lze nakonfigurovat na čítač průchodů cyklem nebo jako časovač doby strávené v cyklu. Dalším ochranným obvodem je „Brown-out“. Tento obvod kontroluje úroveň napájecího napětí a stejně jako Watchdog lze konfigurovat na určité úrovni, na které může napájecí napětí klesnout, aby bylo vyvoláno přerušení.

Běžnou výbavou digitálního regulátoru je také komunikační rozhraní, které umožňuje komunikaci s jinými zařízeními. Použitelnost komunikačního rozhraní může být omezena nepopsáním protokolu komunikační sběrnice, poté je komunikace omezena například jen na zařízení od stejného výrobce nebo s předem definovanými periferiemi. Další možnosti dostupného komunikačního rozhraní mohou být standardizované průmyslové sběrnice, jako například sběrnice CAN nebo Profibus DP.

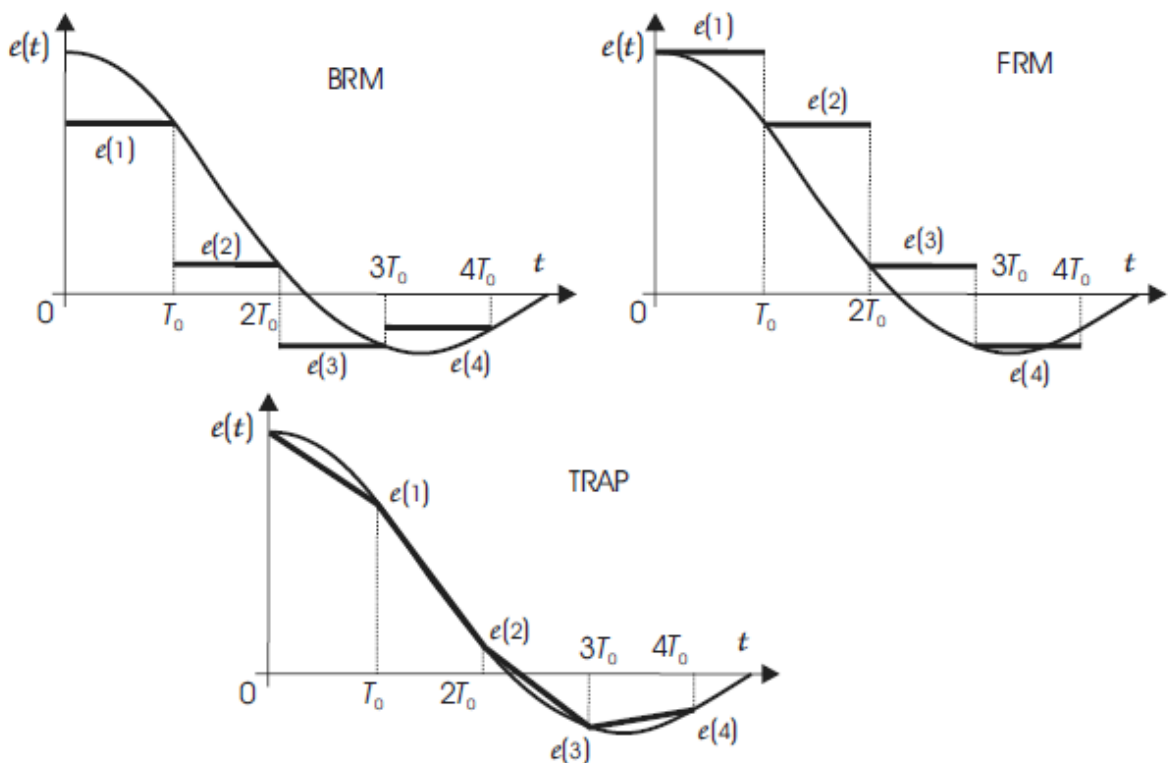
Mikropočítačové digitální regulátory mají nevýhodu, že od výrobce jsou dány určité typy provedení tohoto regulátoru, které jsou jako kompletní zařízení a po koupi je nelze konfigurovat. Takové regulátory nazýváme kompaktní. Druhým typem provedení digitálního regulátoru mohou být regulátory modulární. Tento typ regulátoru nabízí vlastní konfiguraci regulátoru ve smyslu výběru počtu vstupů a výstupů nebo moduly komunikačních rozhraní v podobě modulů (Hlava, 2000; Konfršt, 2014).

4.1 PSD REGULÁTORY

Analogové PID regulátory jsou natolik efektivní, že jejich regulační schopnosti byly převedeny i do digitální podoby. Zkratka PSD regulátorů znamená Proporcionalně-Sumačně-Diferenční. Integrační a derivační složky byly nahrazeny sumační a diferenční, aby bylo možné provádět numerické operace v diskrétní oblasti.

Kvalita regulace PSD regulátorů závisí na rychlosti vzorkování signálu, čím větší počet vzorků, tím větší kvalita. Nízká perioda vzorkování přináší i nevýhodu v možném šumu, proto jsou regulátory vybaveny filtry, kterými šum filtrují.

Sumační složka není nic jiného než výpočet plochy za pomoci součtu geometrických obrazců. Využívá se tří základních metod výpočtu plochy. V prvních dvou metodách se počítá suma ploch obdélníků. Metoda dopředné obdélníkové náhrady (FRM) počítá plochu obdélníku o velikosti regulační odchylky z předešlého kroku. Metoda zpětné obdélníkové náhrady (BRM) počítá, na rozdíl od metody předešlé, obsah obdélníku z aktuální regulační odchylky. Poslední z metod sumace ploch průběhu regulované odchylky je metoda lichoběžníkové náhrady (TRAP). Tato metoda představuje nejpřesnější aproximaci. Počítá plochu dvou lichoběžníků za použití hodnot regulační odchylky aktuálního a minulého kroku. Aritmetickým průměrem je získána hodnota pro výpočet plochy. Šířku geometrických obrazců vždy představuje vzorkovací perioda (Bobál, 2005).



Obrázek 4.2 – Metody výpočtu sumační složky (Bobál, 2005)

Diferenční složka má podobu zpětné diference 1. řádu. Je definovaná jako rozdíl hodnot regulační odchylky aktuálního a minulého kroku za vzorkovací periodu.

Funkce akční veličiny PSD regulátoru s využitím sumační složky s výpočtem plochy pomocí lichoběžníků je

$$u(kT) = r_0 \cdot \left[e(kT) + \frac{1}{T_1} \cdot \sum_{i=1}^k \frac{e(iT) + e[(i-1)T]}{2} \cdot T_D \cdot \frac{e(kT) + e[(k-1)T]}{T} \right], \quad (4.1)$$

kde k je k -tý krok,

T je vzorkovací perioda.

5 PRŮMYSLOVÉ REGULÁTORY

Průmyslové regulátory jsou konstruovány do náročného prostředí průmyslových hal. Jejich velkou výhodou oproti klasickým regulátorům je spolehlivost. Dělí se podle způsobu provedení na kompaktní a modulární, druhá z uvedených je rozšířenější. Často jsou vybaveny možností umístění na DIN lištu. Modulární průmyslové regulátory jsou snadno rozšiřitelné. Dalším kritériem pro výběr je možnost úpravy programu regulátoru. Regulátory s omezenou možností programování nabízí výběr mezi několika regulačními algoritmy. Možnost vytvoření složité regulační struktury pomocí funkčních bloků umožňují volně programovatelné regulátory. Mimo funkčních bloků je možné do programu přidat i logické operační členy. Pro komunikaci s jinými regulátory ve složitějším regulačním obvodu se využívají normalizované průmyslové sběrnice, zmíněné v kapitole 4. Průmyslovým regulátorům dále nesmí chybět komunikační sběrnice pro snímače, akční členy a další periferie (Profess, 2009).

5.1 KS 90-1

Regulátor KS 90-1 je vhodný pro regulování teploty, tlaku, hladiny a dalších procesních veličin. Je schopný provádět diskrétní i spojitou regulaci. Obsahuje konektor BluePort s rozhraním RS232, díky kterému lze komunikovat s konfiguračním programem BlueControl Expert. Připojením ke konfiguračnímu programu BlueControl Expert je možné nastavit například blokování ovládání heslem, konfiguraci Master/Slave, linearizaci čidel a další. Jeho nízký čas cyklu 100 ms umožňuje použitelnost v rychlých regulačních obvodech. Je konstruován jako zásuvný modul, který lze rozšiřovat dalšími moduly periferií. Regulátor je vybaven různými alarmy. Alarmy regulátoru KS 90-1 mohou být nastaveny, aby hlídaly topný proud, přerušení regulační smyčky a poruchu čidla. Samočinné nastavení parametrů se provádí při startu nebo na žádané hodnotě. Pro základní ovládání regulátoru se využívá tlačítek na předním panelu (Profess, 2009).



Obrázek 5.1 – Regulátor KS 90-1 (PMA, 2012)

5.2 KS 98-1

Stejně jako regulátor KS 90-1 je určen pro regulaci technologických procesů. Lze použít jako spojitý i nespojitý regulátor. Konfigurační program BlueControl Expert lze připojit pomocí rozhraní RS232 přes BluePort. Je k dispozici využití sběrnice RS485 a Profibus DP. S regulátorem KS 90-1 má také společný čas cyklu 100 ms. Řadí se mezi modulární regulátory.



Obrázek 5.2 – Regulátor 98-1 (PMA, 2012)

Je volně programovatelný za pomoci inženýrského softwaru ET/KS98. V prostředí ET/KS98 lze nakonfigurovat typ použitého regulátoru. Před spuštěním do provozu je možné využít v simulačním programu SIM/KS98. Samočinné nastavení parametrů je oproti předešlému regulátoru pokročilejší. Přední panel regulátoru je osazen LCD displejem a tlačítky pro ovládání základních funkcí a zobrazení parametrů regulátoru (Profess, 2011a).

6 SAMOČINNÉ NASTAVENÍ PARAMETRŮ

Autotuning je automatizovaný proces nastavení parametrů regulátoru. Průmyslové regulátory jsou v současnosti velmi často vybaveny možností samočinného nastavení parametrů. Vychází z teorie adaptivního řízení a převádí ji do praktického využití. Pro získání parametrů regulátoru je zapotřebí znát model regulované soustavy nebo takzvaný povahopis. Povahopis jsou pravidla, podle kterých popisujeme chování soustavy. Proces autotuningu započne vyvolání poruchy, následovnou odezvu na poruchu regulátor zaznamená a vypočte z ní parametry regulátoru.

Poruchy mohou mít podobu impulzu, jednotkového skoku nebo harmonického signálu. Každý výrobce průmyslových regulátorů si vyvíjí vlastní samonastavovací software. Software jednotlivých firem se může lišit např. použitou metodou autotuningu nebo tvarem vypočítávaného regulátoru.

Autotuning prováděn při nesprávném chování regulačního obvodu vždy nevyřeší problém v regulačním obvodu, protože regulátor nemusí být chybně nastaven. Problém může nastat při nesprávném chování jakéhokoli jiného členu regulačního obvodu, proto by měl být operátor natolik zkušený v této problematice, aby problém s charakteristickými znaky dokázal odhalit před zbytečným přenastavením regulátoru na chybně pracující regulační obvod (Bobál, 2005; Klán, 2009).

6.1 METODA OPTIMÁLNÍHO MODULU

U této metody regulátor vyvolá skokovou změnu akční veličiny a sleduje přechodovou charakteristiku, která se aproximuje přenosem (maximálně osmého řádu) popsany tímto vztahem

$$G_M(s) = \frac{K}{(\tau_M \cdot s + 1)^n}, \quad (6.1)$$

kde τ_M je časová konstanta.

Ze získaného přenosu se vypočítají parametry PID regulátoru. Metoda optimálního modulu dokáže pracovat s dopravním zpožděním. Odezva na žádanou hodnotu bude vždy vykazovat překmit, pro požadavek na řízení bez překmitu regulátor nastaví zesílení na 20 % aktuální hodnoty. Metodu optimálního modulu používá firma Siemens u regulátoru SIPART (Bobál, 2005; Klán, 2009).

6.2 METODA LIMITNÍHO CYKLU

Princip této metody vychází z kritického zesílení a kritické periody. Využitím dvoupolohové reléové nelinearity ve zpětné vazbě v nastavovacím režimu docílíme kmitání výstupu soustavy kolem žádané hodnoty. Toto zapojení potlačuje vysoké frekvence. Amplitudy vyšších harmonických jsou neznatelné proti základním frekvencím. Tím pádem se můžou zanedbat a výsledné průběhy regulační odchylky a regulované veličiny nazvat harmonickými. Frekvence této soustavy bude frekvencí kritickou a získáme jí pomocí algoritmu detekujícím průchod signálu regulační odchylky časovou osou. Ve vztahu 6.2 je vidět výpočet kritického zesílení

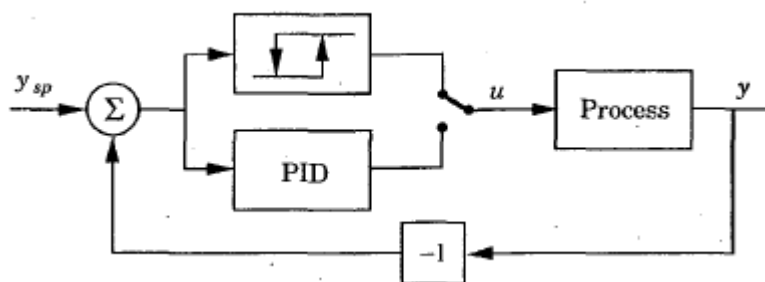
$$r_k = \frac{4 \cdot M}{A \cdot \pi}, \quad (6.2)$$

kde π je Ludolfovo číslo,

M je amplituda na výstupu reléové nelinearity,

A je amplituda výstupního signálu.

Pro správné nastavení parametrů regulátoru musí být soustava přivedena do stavu předpokládaného pracovního rozsahu. Získané hodnoty jsou kritická perioda a kritická frekvence. Upravená forma s nelineárními členy se dnes využívá s rozšířením o měření statického zesílení (Åström, 1995; Bobál, 2005).



Obrázek 6.1 – Zapojení pro metodu limitního cyklu (Åström, 1995)

6.3 METODA ZALOŽENÁ NA REAKCI NA SKOKOVOU ZMĚNU AKČNÍ VELIČINY

Metoda je založena na sledování přechodové charakteristiky. Využívá se postupu konstrukce směrnice tečny v inflexním bodu. Inflexní bod je charakterizován jako bod, ve kterém je druhá derivace funkce rovná nule, funkce druhé derivace přechází z kladné do

záporné nebo naopak. Při této metodě se zaznamenají počáteční podmínky a poté se provede jednotkový skok. Průběh reakce na skokovou změnu je uložen do dosažení inflexního bodu, kdy se zaznamená čas a velikost výstupní veličiny. Poloha inflexního bodu se detekuje za pomoci výpočtu druhé derivace, kdy je její hodnota rovná nule nebo při změně znaménka hodnoty druhé derivace z kladné na zápornou. Ze získaných dat se vypočítá tečna v inflexním bodě. Získáním průsečíku tečny s časovou osou se získá doba průtahu T_u , podle které lze přechodovou charakteristiku aproximovat přenosem ve vztahu,

$$G_S(s) = \frac{K}{[s \cdot (T_u \cdot s + 1)]} \quad (6.3)$$

Snížením zesílení K se předchází překmitu. Podle tohoto přenosu jsou navrženy parametry PI regulátoru. Po připojení PI regulátoru k regulované soustavě se vyčká na ustálení regulovaného obvodu a odečtou se hodnoty akční veličiny a výstupu soustavy. Pomocí těchto dvou hodnot se vypočte statické zesílení a doba náběhu T_n .

Metoda je využita v regulátorech firem Siemens, Allen Bradley, ABB atd. Tato metoda je také vhodná pro systémy s pomalou odezvou a dopravním zpožděním. V praxi s touto metodou lze setkat pod názvem Accutune (Konfršt, 2014).

6.4 METODY VYUŽÍVANÉ V REGULÁTORU KS 90-1

Protože vlastnosti regulovaného procesu se mohou měnit, lze v regulátoru KS 90-1 využít dvou sad parametrů. Samooptimalizací nastavuje sadu parametrů, která je momentálně používaná. Obě sady obsahují parametry:

- pásmo proporcionality 1 (pro topení),
- integrační konstanta 1 (pro topení), s,
- derivační konstanta 1 (pro topení), s
- minimální doba cyklu 1 (pro topení), s,
- pásmo proporcionality 2 (pro chlazení),
- integrační konstanta 2 (pro chlazení), s,
- derivační konstanta 2 (pro chlazení), s
- minimální doba cyklu 2 (pro chlazení), s.

Pro správné nastavení parametrů je potřeba správně připravit regulátor a zajistit odstup žádané hodnoty od regulované veličiny alespoň 10 % z rozsahu žádané hodnoty. Stanovení rozsahu regulace se provede pomocí nastavení parametrů počátku a konce regulačního rozsahu. Dále lze určit parametry, které je potřeba optimalizovat. Samooptimalizace může proběhnout:

- skokovou metodou při náběhu,
- pulzní metodou při náběhu,
- optimalizací na žádané.

Pro regulaci při náběhu je potřeba zajistit dostatečný odstup regulované veličiny a žádané hodnoty. Odstup regulátoru zajišťuje stanovení parametrů pomocí sledování náběhu. Na provedení je jednodušší skoková metoda, akční veličina je nastavena na 0 % rozsahu akční veličiny a čeká se na ustálení regulovaného obvodu. Následuje skok akční veličiny na 100 % rozsahu a z reakce nastavené parametry se použijí na ustálení regulované soustavy na žádané hodnotě. Pulzní metodu je doporučeno provést až po úspěšně provedené skokové metodě. Podobně jako u skokové metody se výstup z regulátoru nastaví na 0 % rozsahu a po ustálení výstupu regulované soustavy se provede krátký pulz akční veličiny na 100 % rozsahu. Po úspěšném vyhodnocení parametrů pokračuje regulátor s nově nastavenými parametry v regulaci na žádanou hodnotu.

K úspěšnému průběhu optimalizací na žádané hodnotě je zapotřebí ustálené hodnoty bez oscilací větších než 0,5 % regulovaného rozsahu. Z regulátoru je zavedena porucha do regulované soustavy v podobě krátkého pulzu akční veličiny o maximální velikosti 20 % regulovaného rozsahu. Vyhodnocením reakce na provedený pulz je nastavena sada parametrů. Výhodou této metody je malá změna regulační odchylky způsobená samooptimalizací (PMA, 2011b).

6.5 METODY VYUŽÍVANÉ V REGULÁTORU KS 98-1

Pro konfiguraci samooptimalizačních metod se využívá programu PMA Tune nebo jeho nadstavby v podobě inženýrského softwaru ET/KS98. ET/KS98 je grafickým editorem používaným ke konfiguraci regulátoru. V tomto programu je na výběr ze tří funkčních bloků regulátorů. Regulační bloky COUNTR a COUNTR+ optimalizují parametry pro sériový tvar PID regulátoru. Blok PIDMA se využívá na složitější typy regulovaných soustav s dopravním zpožděním. Blok COUNTR+ má, na rozdíl od bloku COUNTR, šest sad parametrů. Regulační bloky COUNTR a COUNTR+ obsahují stejné parametry jako regulátor KS 90-1. Oba regulační bloky jsou vhodné pro statické regulační obvody bez dominantního dopravního zpoždění (PMA, 2006).

6.5.1 Funkční bloky COUNTR a COUNTR+

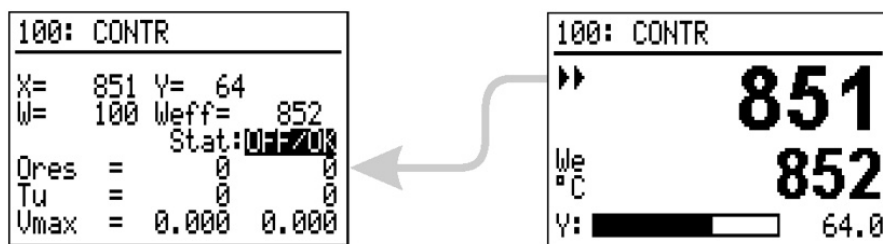
Využívají odezvy regulované soustavy na skokovou změnu akční veličiny. Z odezvy soustavy blok regulátoru určí parametry pro vybraný typ regulačního algoritmu podle tab. 6.1.

Tab. 6.1 – Výběr regulačního algoritmu v bloku COUNTR

Typ algoritmu	T_n	T_v
Regulátor P	= 0	= 0
Regulátor PI	= 0	< 0
Regulátor PD	< 0	= 0
Regulátor PID	< 0	< 0

Stejně jako u předešlého regulátoru je potřeba zajistit dostatečný rozdíl žádané hodnoty od regulované veličiny. Pro začátek optimalizace musí být regulovaná soustava v ustáleném stavu po dobu 60 s. Za ustálený stav výstupu se považuje nepřekročení tolerančního pásma a v bloku regulátoru je vyznačován zkratkou PiR. Při překročení je vynulován stav PiR a čítač doby ustáleného stavu resetován. Regulátor může být nastaven i pro klesající nebo rostoucí hodnoty výstupu, kdy toleranční pásmo sleduje konstantní gradient výstupní hodnoty (Profess, 2006).

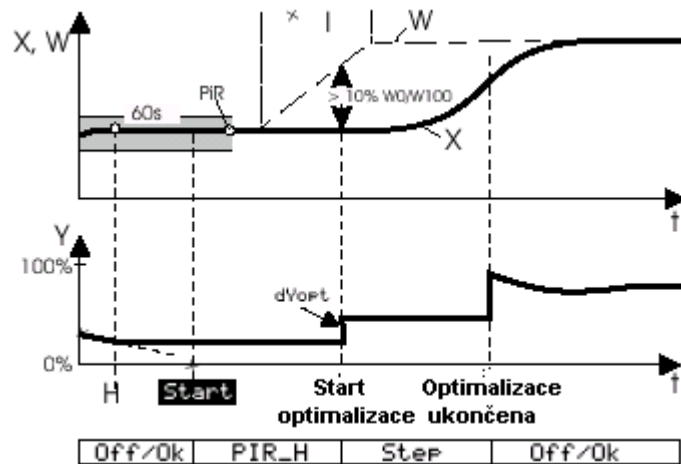
Start samooptimalizace je možné spustit v automatickém režimu nebo ručně. Ruční start optimalizace se provede nalezením stránky funkčního bloku a změnou parametru Stat: OFF/OK na Stat: Start. Postup ručního spuštění je na obrázku 6.2.



Obrázek 6.2 – Ruční spuštění samooptimalizace bloku COUNTR
(Profess, 2006)

Při ručně započaté samooptimalizaci se po požadavku čeká na ustálení výstupní hodnoty PiR a při následné skokové změně žádané hodnoty a akčního zásahu začne regulátor s určením parametrů pro topení. Pro určení parametrů pro chlazení by musel být postup opakován

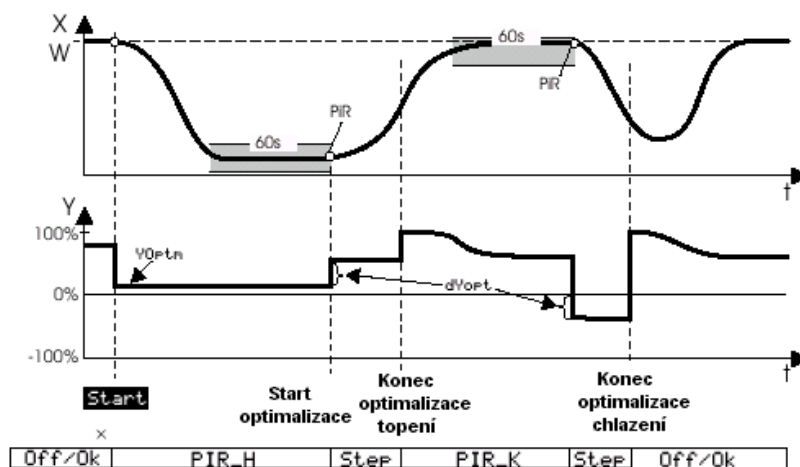
s akčním zásahem a s žádanou hodnotou opačné polarity (Profess, 2006). Příklad ručně



Obrázek 6.3 – Ručně spuštěná samooptimalizace bloku COUNTR (Profess 2006)

započaté samooptimalizace je na obrázku 6.3.

Automatické spuštění samooptimalizace se provede změnou akční veličiny na předem definovanou hodnotu. Po ustálení regulační soustavy je proveden skok akční veličiny a ze sledované reakce výstupní hodnoty se vyhodnotí parametry regulátoru pro první část parametrů. Pro získání druhé části parametrů se výstupní hodnota ustálí na žádané hodnotě, a poté se provede skoková změna akční veličiny chlazení. Z reakce na skokovou změnu chlazení se určí parametry regulátoru a po úspěšné samooptimalizaci regulátor pokračuje s nově nastavenými parametry (Profess, 2006). V případě chybné samooptimalizace se regulátor nastaví do původního stavu. Příklad automatické samooptimalizace je na obrázku 6.4.

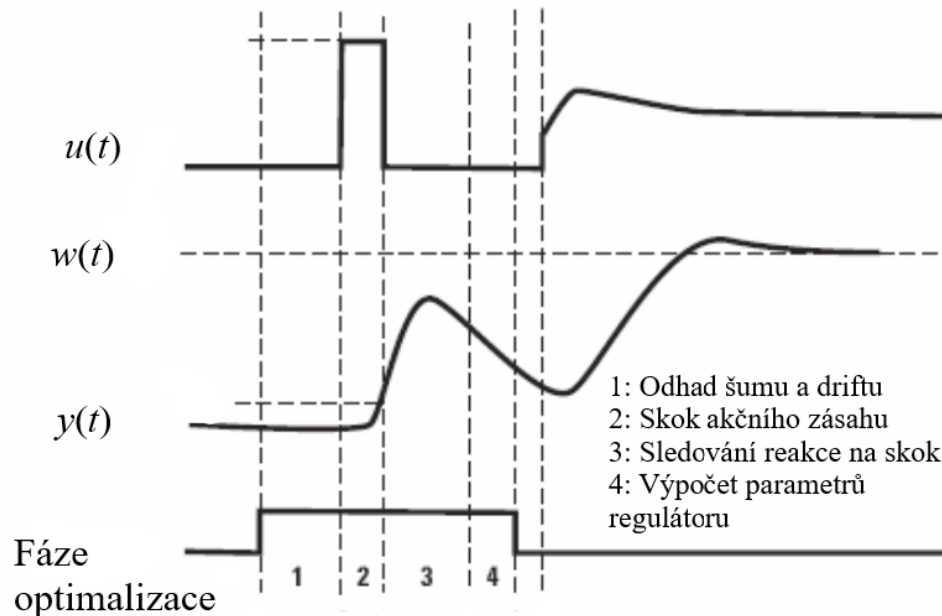


Obrázek 6.4 – Automatická samooptimalizace bloku COUNTR (Profess, 2006)

6.5.2 Funkční blok PIMDA

Blok PIDMA je regulačním blokem, který se liší paralelní strukturou, a použitým algoritmem samooptimalizace. Ostatní funkce jsou stejné jako u bloků COUNTR. Tento funkční blok je díky expertnímu samooptimalizačnímu algoritmu vhodný pro obtížné soustavy. Má možnost nastavení zesílení derivační složky, která se automaticky při optimalizaci přizpůsobí dynamice regulované soustavy. Na rozdíl od bloků COUNTR nemá blok PIDMA rozdílné parametry pro topení a chlazení. Parametry P_{Type} , $Drift$, C_{Speed} , X_{limit} a T_{noise} se spolu s parametrem dY_{opt} využívají jako podmínky pro optimalizaci. Parametrem P_{Type} se nastaví typ soustavy, zda se jedná o soustavu statickou nebo astatickou. Parametr $Drift$ kompenzuje plynulé klesání nebo stoupání regulované veličiny před startem. C_{Speed} určuje rychlost regulace, s kterou souvisí překmit. Dále se nastavuje T_{noise} , který určuje délku doby detekce šumu. Hodnota délky detekce šumu a driftu musí být dostatečně dlouhá, aby se zjistil rozptyl regulované veličiny bez působení akční veličiny. Po uplynutí doby detekce šumu a driftu se akční zásah změní o velikost parametru dY_{opt} . Regulátor sleduje odezvu. Po dosažení parametru maxima regulované veličiny X_{limit} se akční zásah vrátí na původní hodnotu. Průběh reakce se sleduje až zhruba do dosažení poloviny mezi maximem a původní hodnotou. Po ukončení se zobrazí parametry vypočtené algoritmem. Regulační blok PIDMA nevyhodnocuje ustálený stav soustavy. To znamená, že

start optimalizace je zcela určen obsluhou. Nejlepší výsledky optimalizace jsou při startu v ustáleném stavu bez dynamických změn (Profess, 2006).



Obrázek 6.5 – Samooptimalizace bloku PIDMA (Profess, 2006)

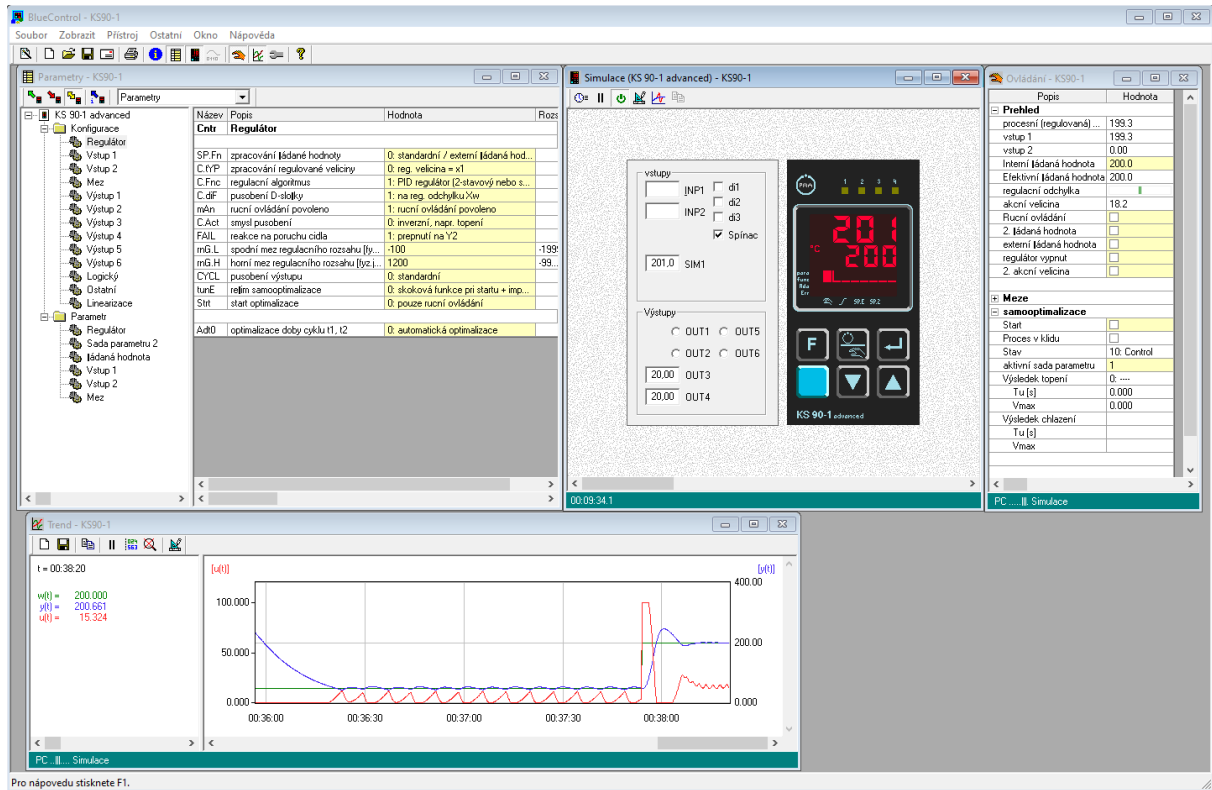
7 SIMULACE REGULÁTORŮ FIRMY PMA

Ověření a simulace funkcí regulátorů KS 90-1 a KS 98-1 bylo provedeno firemním softwarem BlueControl Expert a SIM/98. Pro konfiguraci a simulaci průmyslových regulátorů KS 90-1 a KS 98-1 se využívá rozhraní RS232, kterým je regulátor připojen k počítači. KS 90-1 je kompatibilní s programy PMA Tune a BlueControl Expert. Zmíněné programy jsou v této kapitole využity k ověření funkcí regulátoru KS 90-1. Regulátor KS 98-1 nabízí možnost simulace pomocí programu SIM/KS98 nebo propojením PMA Tune s BlueControl Expert.

7.1 BLUECONTROL EXPERT

Software BlueControl Expert je navržen pro konfiguraci regulátorů firmy PMA. Obsahuje simulační prostředí s možností otestovat chování regulačního obvodu. Alarmové diody jsou plně konfigurovatelné a slouží k signalizaci dosažení nakonfigurované hodnoty.

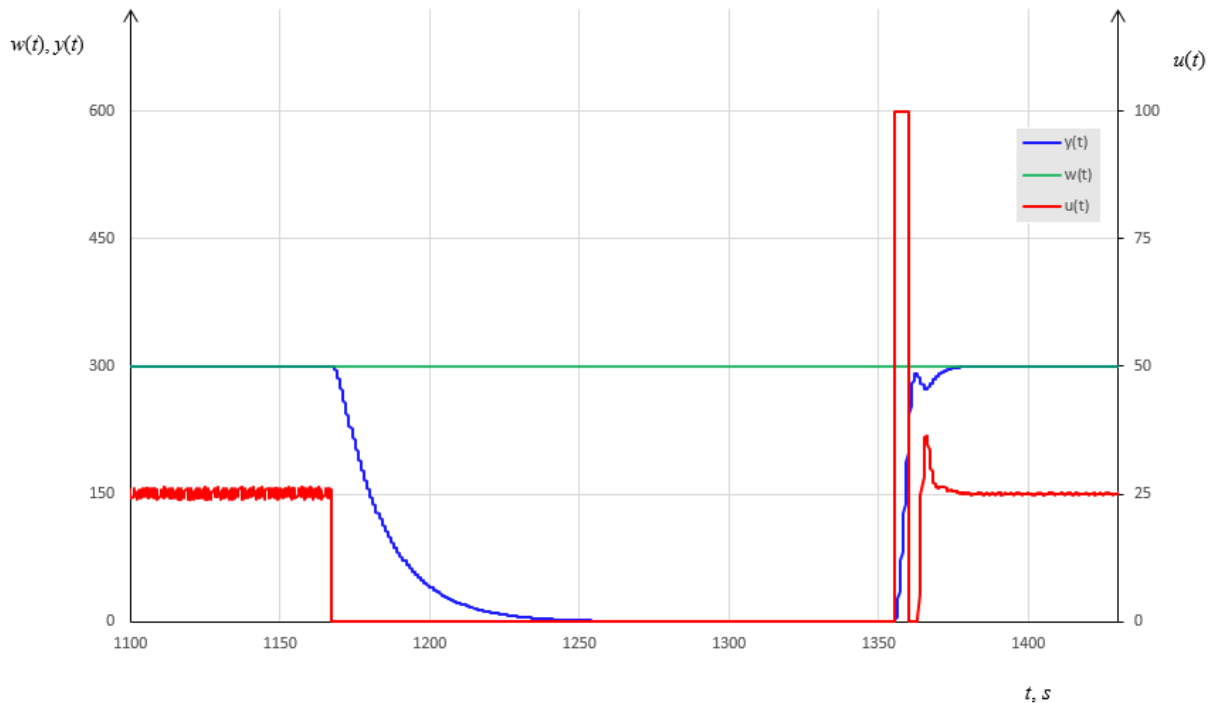
Takto nastavené alarmové diody dodávají operátorovi základní informaci o stavu regulovaného obvodu (Profess, 2006).



Obrázek 7.1 – Prostředí BlueControl Expert

Prostředí BlueControl Expert obsahuje tři možnosti samooptimalizace parametrů regulátoru KS 90-1. Jsou složeny z metod popsaných v kapitole 6. Pro simulaci jsem zvolil soustavu popsanou zesílením $K_p = 1$, dobou průtahu $T_u = 1$ s a dobou náběhu $T_n = 20$ s. Před startem jakékoli samooptimalizace jsem nastavil odhadované parametry regulátoru následovně, pásmo proporcionality $P_{b1} = 200$ %, integrační časová konstanta $t_{i1} = 2$ s, derivační časová konstanta $t_{d1} = 2$ s a minimální dobu cyklu $t_1 = 1$ s. Pro simulaci regulátoru KS 90-1 jsem takto nastavené parametry použil vždy před startem samooptimalizace. Nejjednodušší z nabízených

metod je skoková změna akční veličiny při startu samooptimalizace. Průběh samooptimalizace na obrázku 7.2.

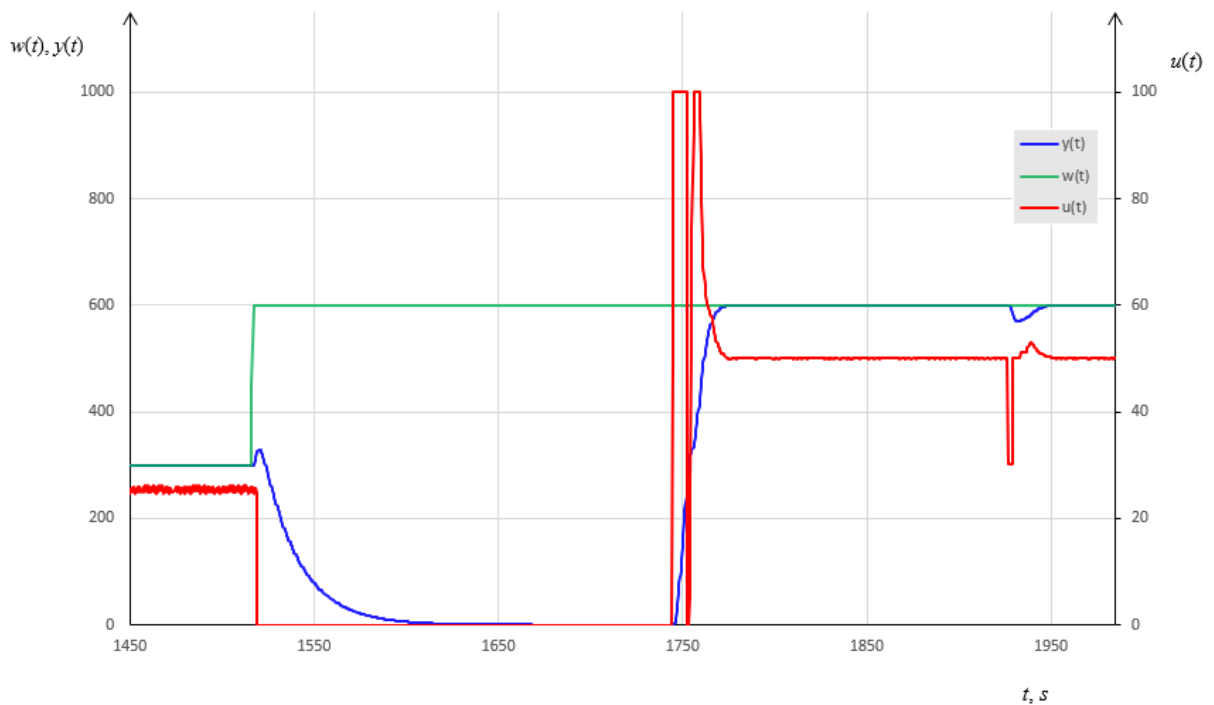


Obrázek 7.2 – Průběh samooptimalizace regulátoru KS 90-1, metoda skokové funkce při startu

Při odstartování optimalizace regulátor provedl nastavení akčního zásahu na nulu a vyčkal na ustálení regulované veličiny. Po zjištění klidového stavu regulátor provede skok, jehož reakce je využita pro výpočet parametrů. Po úspěšné samooptimalizaci regulátor pokračuje s novými parametry.

Druhým typem samooptimalizace používaným v prostředí BlueControl Expert je kombinace skokové funkce při startu a impulzní funkce na žádané hodnotě. Pro úspěšné provedení samooptimalizace je zapotřebí odstupů žádané hodnoty od regulované hodnoty alespoň 10 %. Tato podmínka je splněna při změně žádané hodnoty současně se startem samooptimalizace. Regulátor postupuje stejně jako v předešlé metodě, ale po vyhodnocení parametrů skokové funkce se po ustálení regulované veličiny provede impulzní funkce. Podle

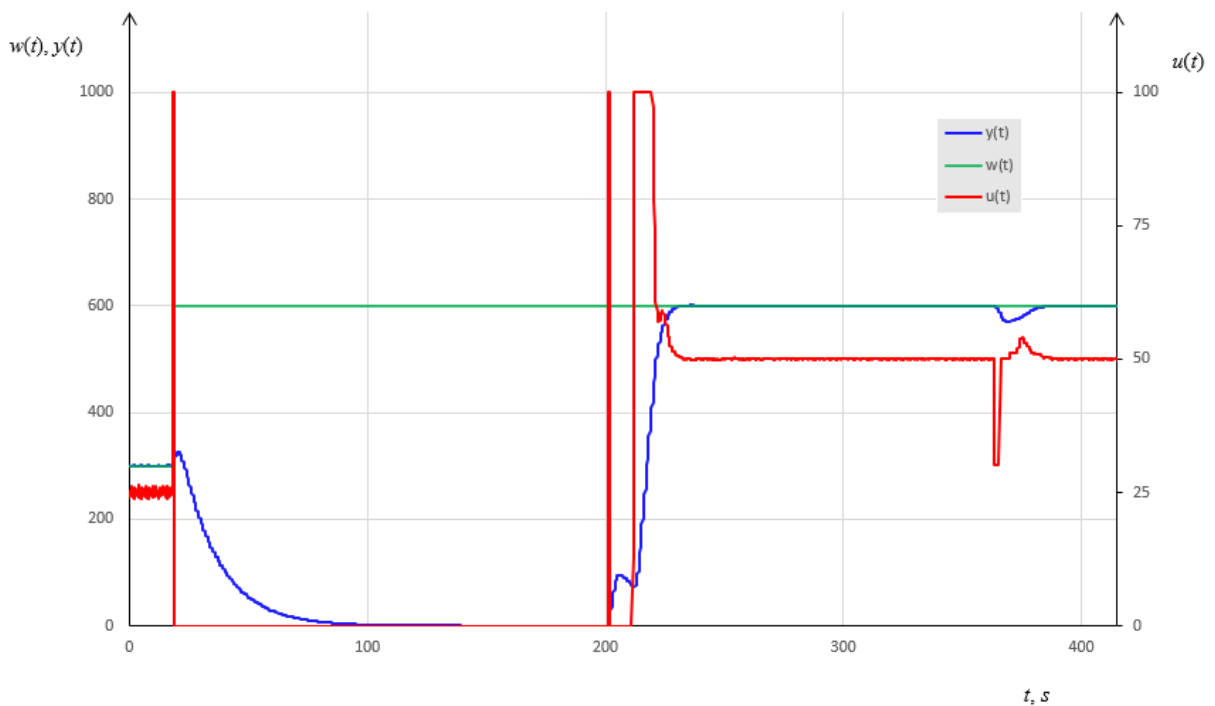
reakce na impuls jsou parametry upraveny a ukončena samooptimalizace (Profess, 2006). Celý průběh je vidění na obrázku 7.3.



Obrázek 7.3 – Průběh samooptimalizace regulátoru KS 90-1, metoda skokové funkce při startu a impulzní funkce na žádané hodnotě

Posledním používaným typem optimalizace je kombinace impulzních funkcí na startu a na žádané hodnotě. Jako u předešlé metody je zapotřebí odstupu žádané hodnoty od regulované veličiny o 10 %. Regulátor po odstartování nastaví akční veličinu na 0 % a nechá regulační veličinu ustálit. Při dosažení klidového stavu se provede impulzní funkce a ze sledované reakce se stanoví nové parametry, s kterými regulátor pokračuje na žádanou hodnotu. Po uvedení regulované soustavy do klidového stavu se provede druhá impulzní funkce a doupraví se parametry regulátoru (Profess, 2006). Průběh samočinného nastavení parametrů pomocí impulzní funkce na startu a na žádané hodnotě je na obrázku 7.4.

Provedené simulační experimenty byly s využitím pouze topící částí parametrů. Regulátory s možností topení i chlazení by při samočinném nastavení parametrů byly rozšířeny o nastavení druhé části se stejným postupem, ale obrácenými akčními zásahy.



Obrázek 7.4 – Průběh samooptimalizace regulátoru KS 90-1, metoda impulzní funkce při startu a impulzní funkce na žádané hodnotě

7.2 PMA TUNE

Inženýrský software PMA Tune nabízí svůj vlastní samooptimalizační algoritmus. K prostředí PMA Tune lze připojit regulátory KS nebo simulovat průběhy regulačních obvodů propojením softwarových aplikací přes PMA Tuning server. Samočinné nastavení parametrů probíhá pomocí algoritmu, který je schopný popsat i soustavy s dominantním dopravním zpožděním. Avšak tento algoritmus není efektivní pro soustavy kmitavé a neminimálně fázové soustavy (po přivedení akčního zásahu výstupní veličina klesá). Algoritmus je použitelný pro soustavy popsateľné přenosovou rovnicí (Rex Controls, 2003)

$$F(s) = \frac{Ke^{-Ds}}{s^l(T_1s + 1) \cdot (T_2s + 1) \cdot \dots \cdot (T_ns + 1)}, \quad (7.1)$$

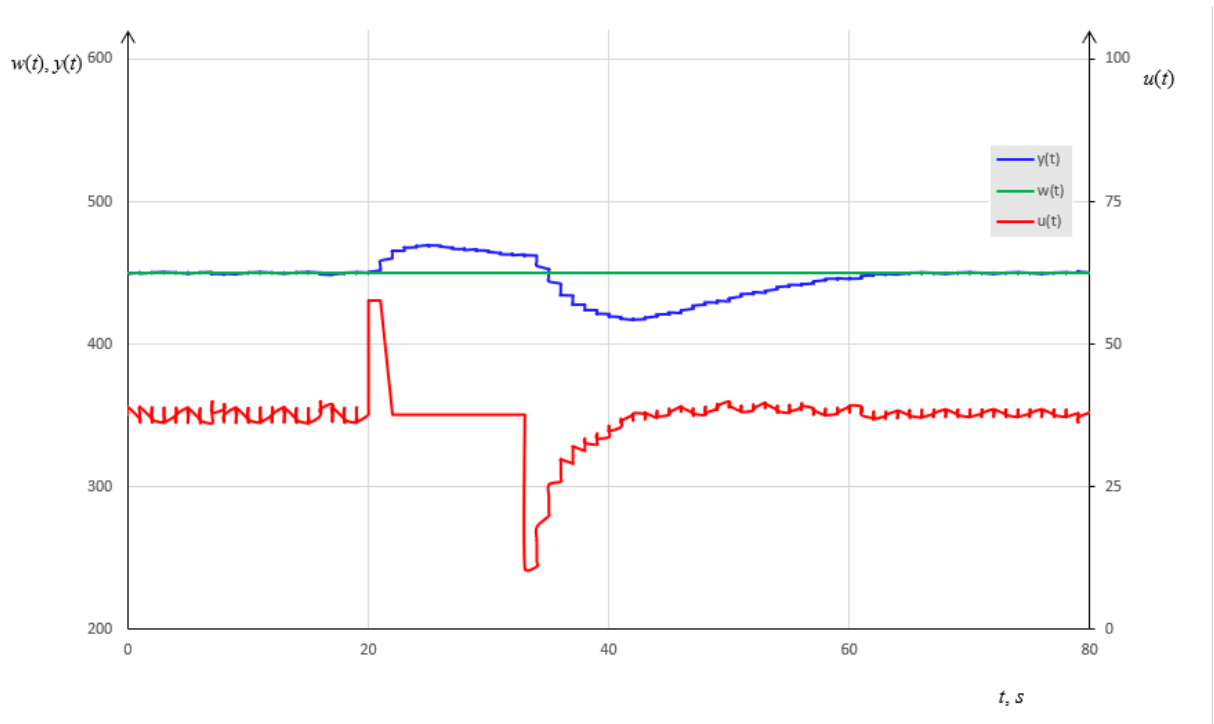
kde D je dopravní zpoždění,

T_1 až T_n jsou časové konstanty,

l je soustava s integrátorem nebo bez integrátoru,

e je Eulerovo číslo.

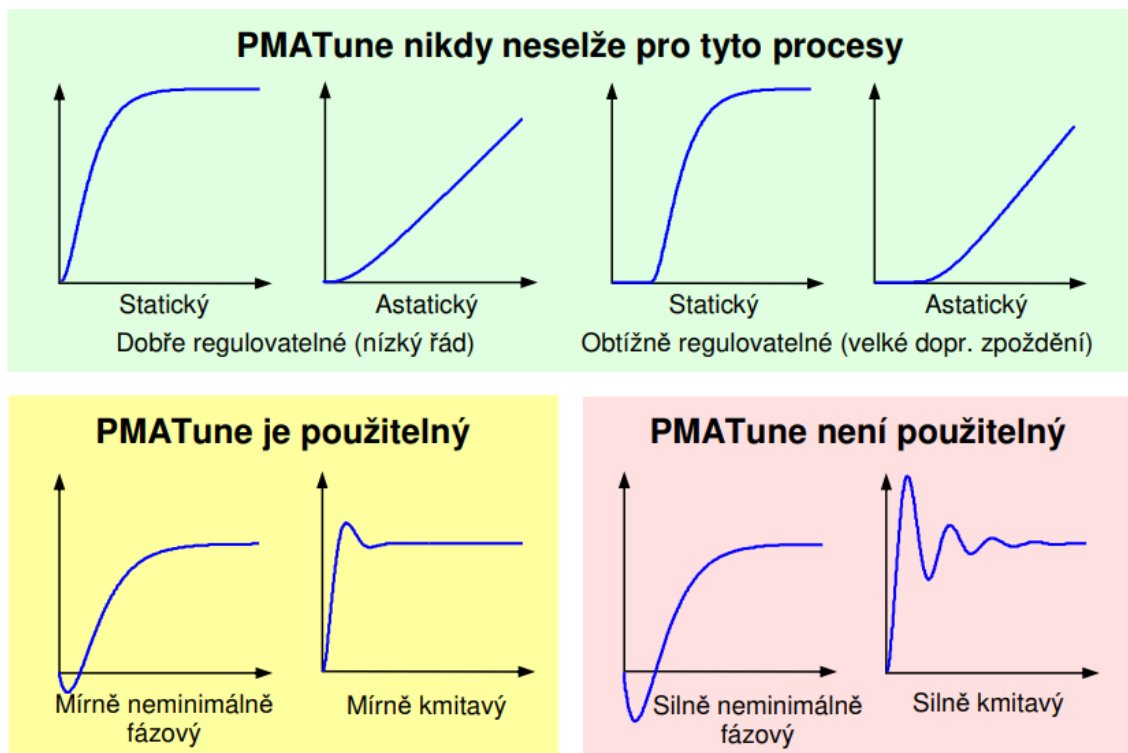
Samočinné nastavení parametrů regulátoru KS 90-1 je provedeno skokovou funkcí na akční veličině a z reakce soustavy stanoveny parametry regulátoru. Aby mohl regulátor úspěšně určit parametry regulátoru, je zapotřebí ustálení regulačního obvodu. Ustálení regulačního obvodu je v PMA Tune ponecháno na operátorovi. Ustáleného stavu, který je nazýván také jako klidový stav, je docíleno po minutě bez oscilací výstupní veličiny přesahujících 0,5 % rozsahu. Po ustálení regulované veličiny je možné spuštění samooptimalizace.



Obrázek 7.5 – Průběh samooptimalizace regulátoru KS 98-1, samooptimalizační algoritmus PMA Tune

Stejný algoritmus samočinného nastavení parametrů regulátoru se provádí u regulátoru KS 98-1. Vlastností tohoto regulátoru je i možnost využití funkčního bloku PIDMA s paralelní strukturou a schopností regulace náročnějších soustav. Prostředí PMA Tune nabízí možnost nastavení parametrů samooptimalizace. Nastavuje se struktura regulátoru, typ procesu, doba kompenzace šumu a driftu, velikost skokové funkce a rychlost regulace. Rychlost regulace se projeví na kvalitě regulace. S rychlejším regulačním pochodem souvisí velikost překmitu

regulované veličiny (Profess, 2006). Soustavy, na které lze regulátor nastavený algoritmem v aplikaci PMA Tune použít, jsou na obrázku 7.6.

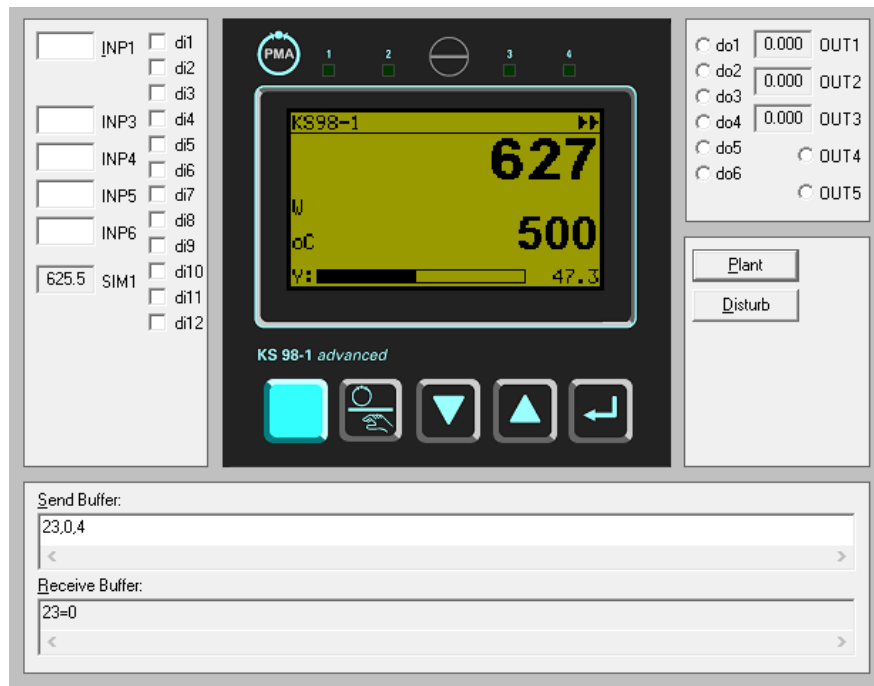


Obrázek 7.6 – Použitelnost algoritmu PMA Tune (Profess, 2006)

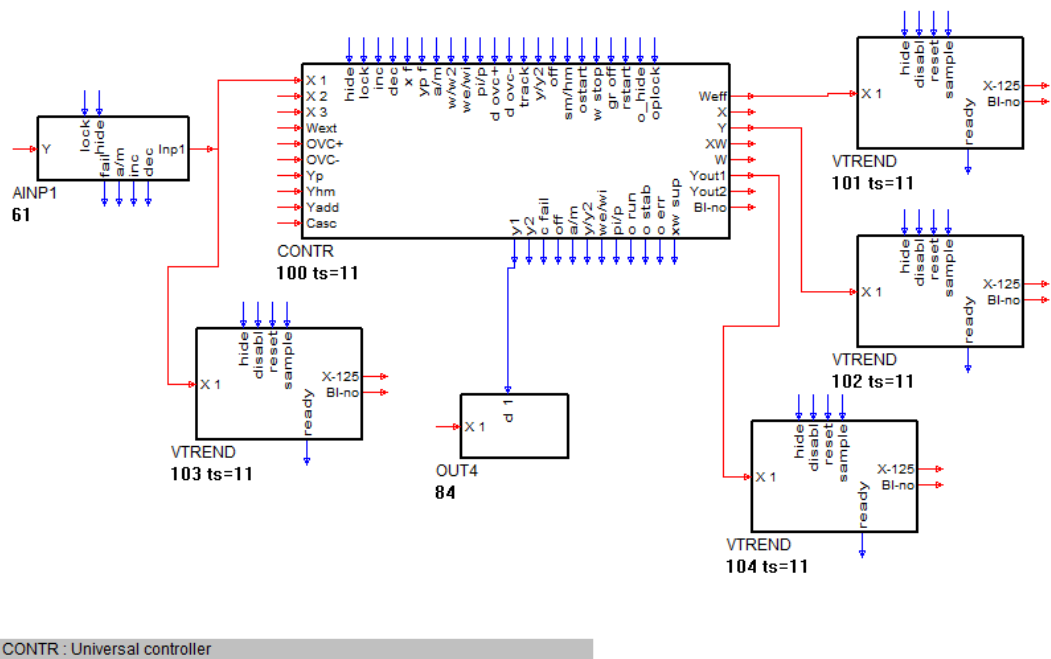
K detailní konfiguraci regulátoru KS 98-1 se používá inženýrský program ET/KS98. Regulátor lze v tomto softwarovém prostředí volně programovat. Pod pojmem volné programování se rozumí zapojení dostupných funkčních bloků do žádané podoby zapojení. Simulovaný regulátor je k dispozici v aplikaci SIM/KS98.

Inženýrský program ET/KS98 má možnost do simulačního programu nahrát nakonfigurované blokové schéma a v simulaci otestovat funkčnost regulátoru. Případné exportování dat ze simulace do programu ET/KS98 je dostupné a pomáhá pro lepší odhad parametrů regulátoru před prvním spuštěním regulátoru v provozu. Na obrázku 7.8 je základní blokové zapojení funkčního bloku COUNTER s univerzálním vstupním blokem AINP1,

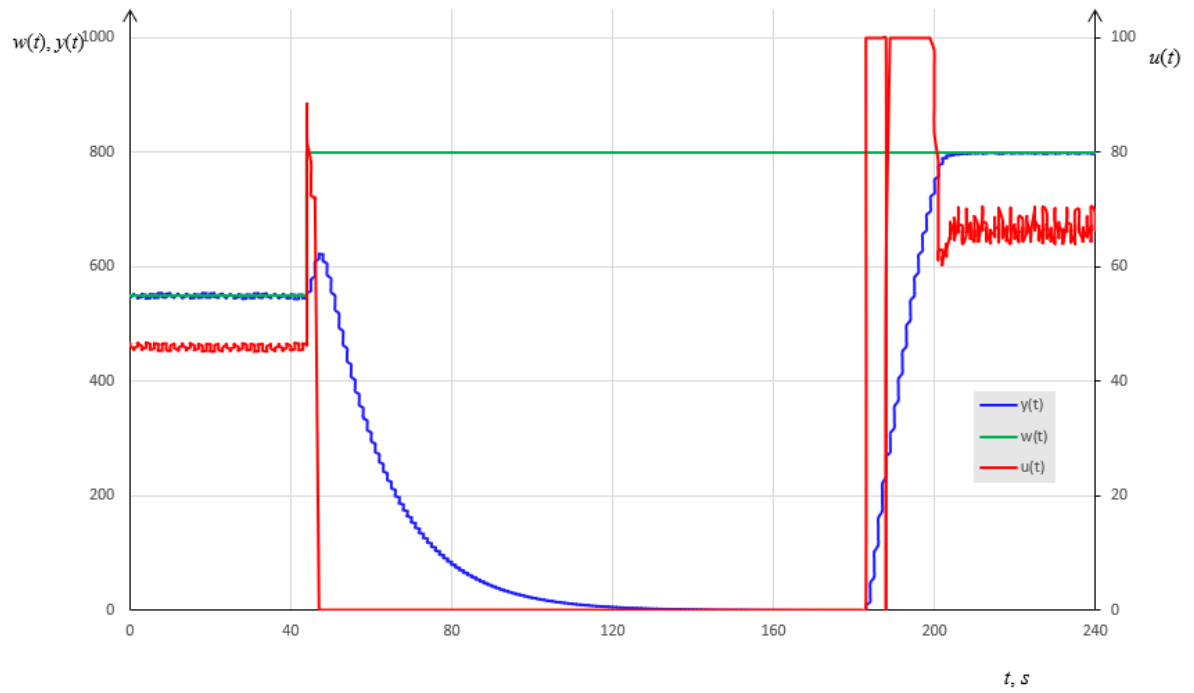
výstupním blokem OUT4 a zobrazovacími bloky VTREND. Průběh samočinného nastavení parametrů je na obrázku 7.9.



Obrázek 7.7 – Prostředí SIM/KS98



Obrázek 7.8 – Prostředí ET/KS98



Obrázek 7.9 – Průběh samooptimalizace regulátoru KS 98-1, samooptimalizace funkčním blokem COUNTR

8 VYHODNOCENÍ SIMULACÍ

Výsledkem samočinného nastavení parametrů regulátoru byly získány sady parametrů, které byly vzájemně porovnány. Sady parametrů jsou porovnány na základě přechodové charakteristiky, ze které jsou získány kritéria kvality. Z přechodové charakteristiky jsou odečteny maximální překmit regulované veličiny, doba odezvy a doba ustálení. Maximální překmit regulované veličiny je udáván v procentech rozsahu žádané veličiny. Doba odezvy je čas, za který dosáhne regulovaná veličiny 95 % žádané veličiny. Poslední z porovnávaných kritérií je doba ustálení, která je definována jako čas, kdy se regulovaná veličina nachází v pásmu $\pm 5\%$. V tabulkách 8.1 a 8.2 jsou zaznamenány výsledná kritéria kvality.

Tab. 8.1 – Kritéria kvality regulátoru KS 90-1

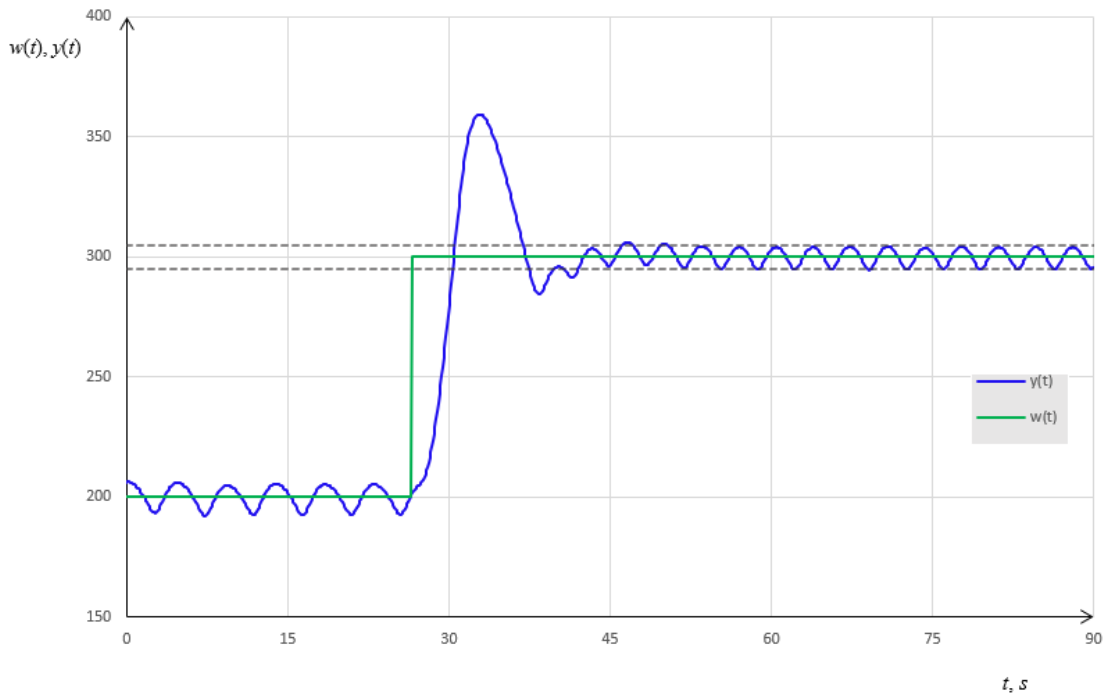
	Max. překmit, %	Doba odezvy, s	Doba ustálení, s
Původní	59,3	3,6	12,1
BlueControl			
Skoková funkce při startu	4,21	3,9	3,9
Skoková funkce při startu a impulzní funkce na žádané	1,29	4,2	4,2
Impulzní funkce při startu i na žádané	3,22	4	4
PMA Tune			
Pomalá	1,72	25,6	25,6
Normální	8,04	9,9	27,7
Rychlá	14,34	5,7	20,3

Tab. 8.2 – Kritéria kvality regulátoru KS 98-1

	Max. překmit, %	Doba odezvy, s	Doba ustálení, s
Původní	19,04	14,6	72,2
ET/KS98			
COUNTR	15,83	30,4	71
PIDMA	14,4	8,2	27

Tab. 8.2 – Kritéria kvality regulátoru KS 98-1

PMA Tune			
Pomalá	16,86	20,4	57,2
Normální	29,51	10,4	47
Rychlá	37,26	8,4	41



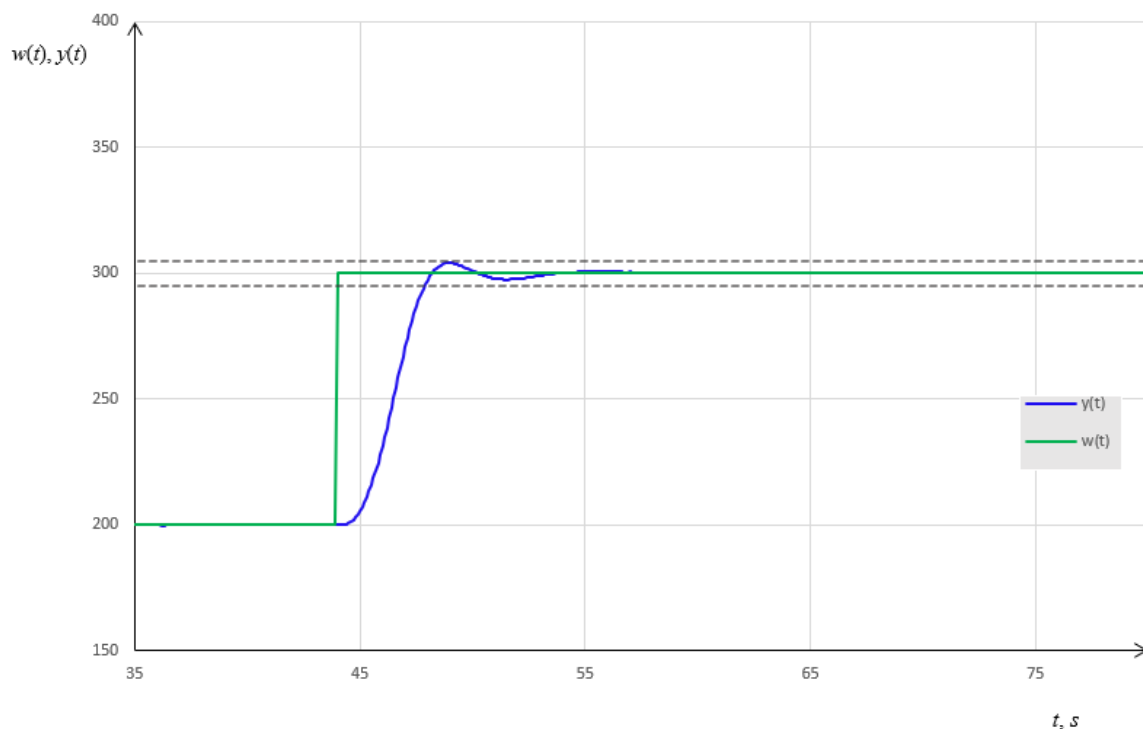
Obrázek 8.1 – Průběh regulace regulátoru KS 90-1 s odhadovanými parametry

Tab. 8.3 – Kritéria kvality regulátoru KS 90-1 s odhadovanými parametry

KS 90-1	Max. překmit, %	Doba odezvy, s	Doba ustálení, s
Odhadované parametry	59,3	3,6	12,1

Tab. 8.4 – Odhadované parametry regulátoru KS 90-1

KS 90-1	Proporcionální složka r_0	Integrační časová konstanta T_I	Derivační časová konstanta T_D	Spínací perioda T
Odhadované parametry	2	2	2	2



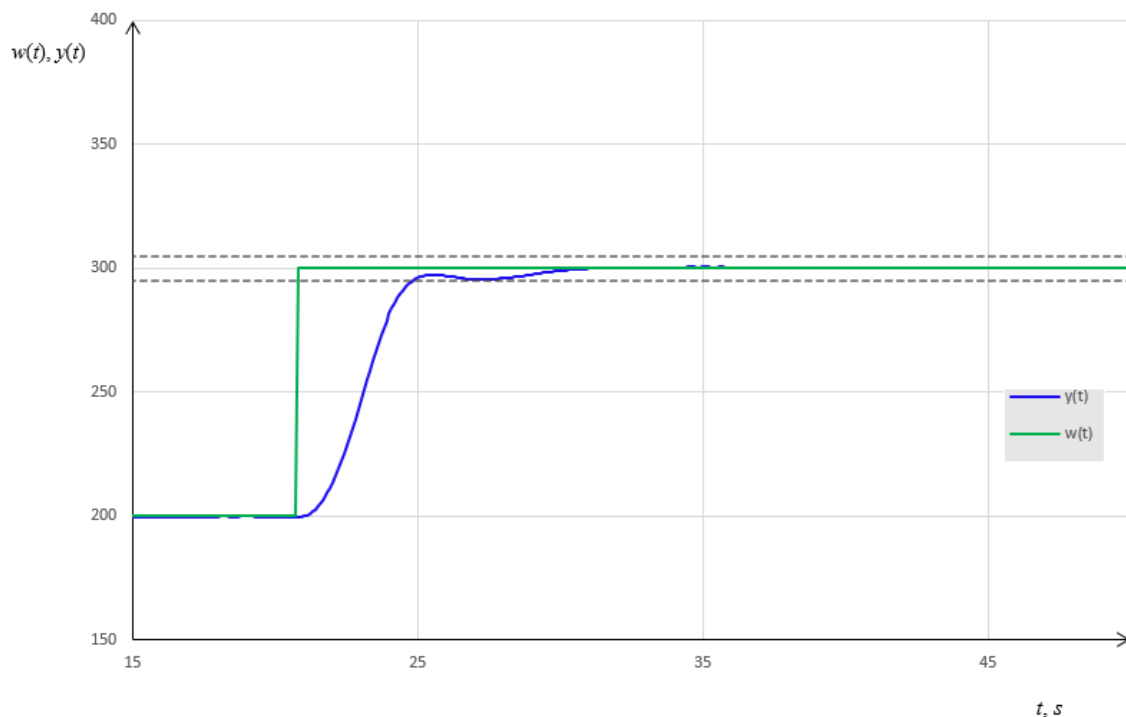
Obrázek 8.2 – Průběh regulace regulátoru KS 90-1, metoda skokové funkce při startu

Tab. 8.5 – Kritéria kvality regulátoru KS 90-1, metoda skokové funkce při startu

BlueControl Expert	Max. překmit, %	Doba odezvy, s	Doba ustálení, s
Skoková funkce při startu	4,21	3,9	3,9

Tab. 8.6 – Parametry regulátoru KS 90-1, získané metodou skokové funkce při startu

BlueControl Expert	Proporcionální složka r_0	Integrační časová konstanta T_I	Derivační časová konstanta T_D	Spínací perioda T
Skoková funkce při startu	1,54	2,6	2,6	0,36



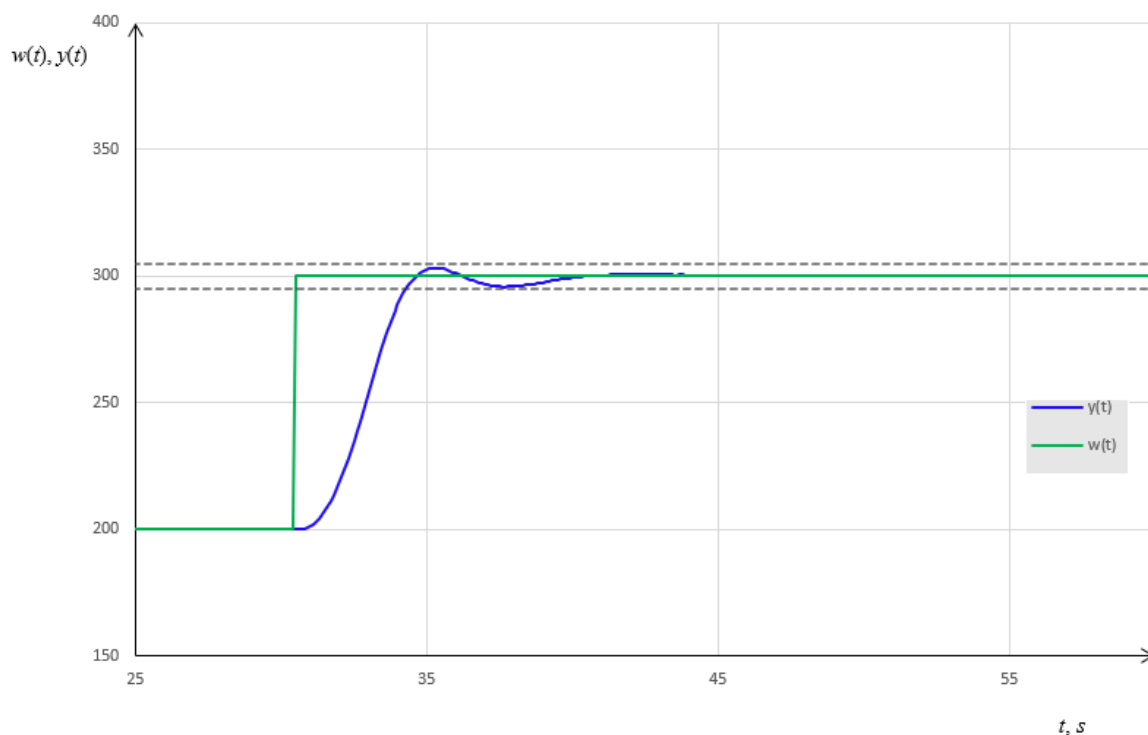
Obrázek 8.3 – Průběh regulace regulátoru KS 90-1, metoda skokové funkce při startu a impulzní funkce na žádané hodnotě

Tab. 8.7 – Kritéria kvality regulátoru KS 90-1, metoda skokové funkce při startu a impulzní funkce na žádané hodnotě

BlueControl Expert	Max. překmit, %	Doba odezvy, s	Doba ustálení, s
Skoková funkce při startu a impulzní funkce na žádané hodnotě	1,29	4,2	4,2

Tab. 8.8 – Parametry regulátoru KS 90-1, získané metodou skokové funkce při startu a impulzní funkce na žádané hodnotě

BlueControl Expert	Proporcionální složka r_0	Integrační časová konstanta T_I	Derivační časová konstanta T_D	Spínací perioda T
Skoková funkce při startu a impulzní funkce na žádané hodnotě	59,3	3,6	12,1	0,39



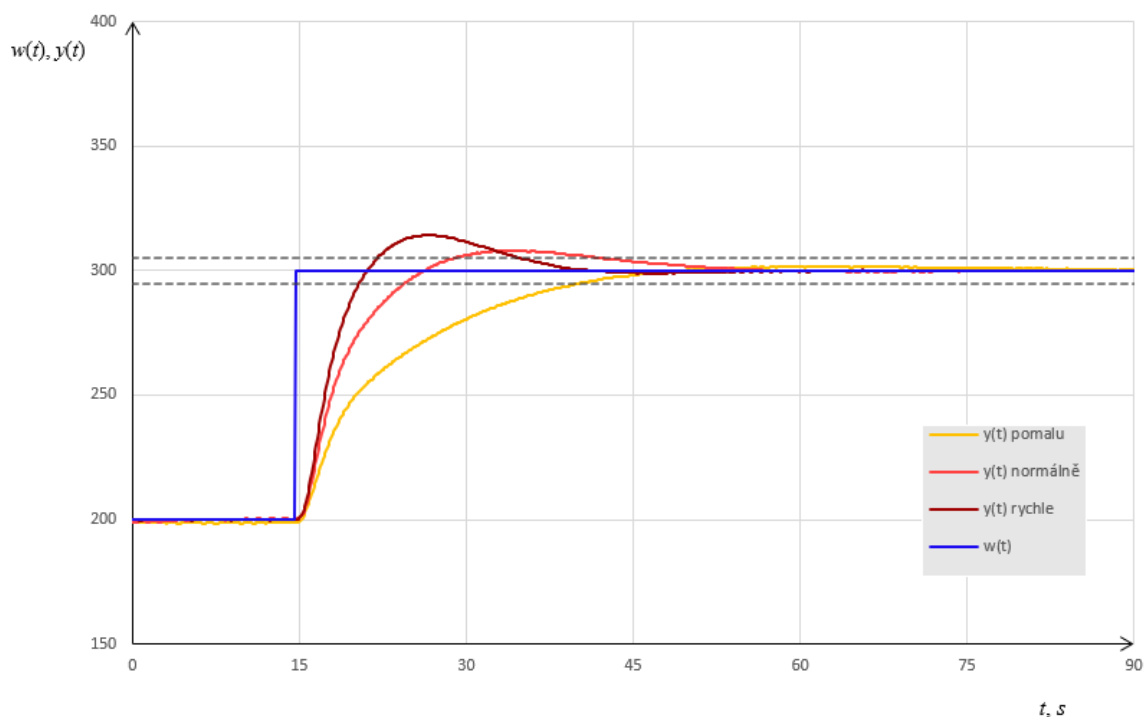
Obrázek 8.4 – Průběh regulace regulátoru KS 90-1, metoda impulzní funkce při startu a na žádané hodnotě

Tab. 8.9 – Kritéria kvality regulátoru KS 90-1, metoda impulzní funkce při startu a na žádané hodnotě

BlueControl Expert	Max. překmit, %	Doba odezvy, s	Doba ustálení, s
Impulzní funkce při startu a na žádané hodnotě	3,22	4	4

Tab. 8.10 – Parametry regulátoru KS 90-1, získané metodou impulzní funkce při startu a na žádané hodnotě

BlueControl Expert	Proporcionální složka r_0	Integrační časová konstanta T_I	Derivační časová konstanta T_D	Spínací perioda T
Impulzní funkce při startu a na žádané hodnotě	1,57	2,8	2,8	0,38



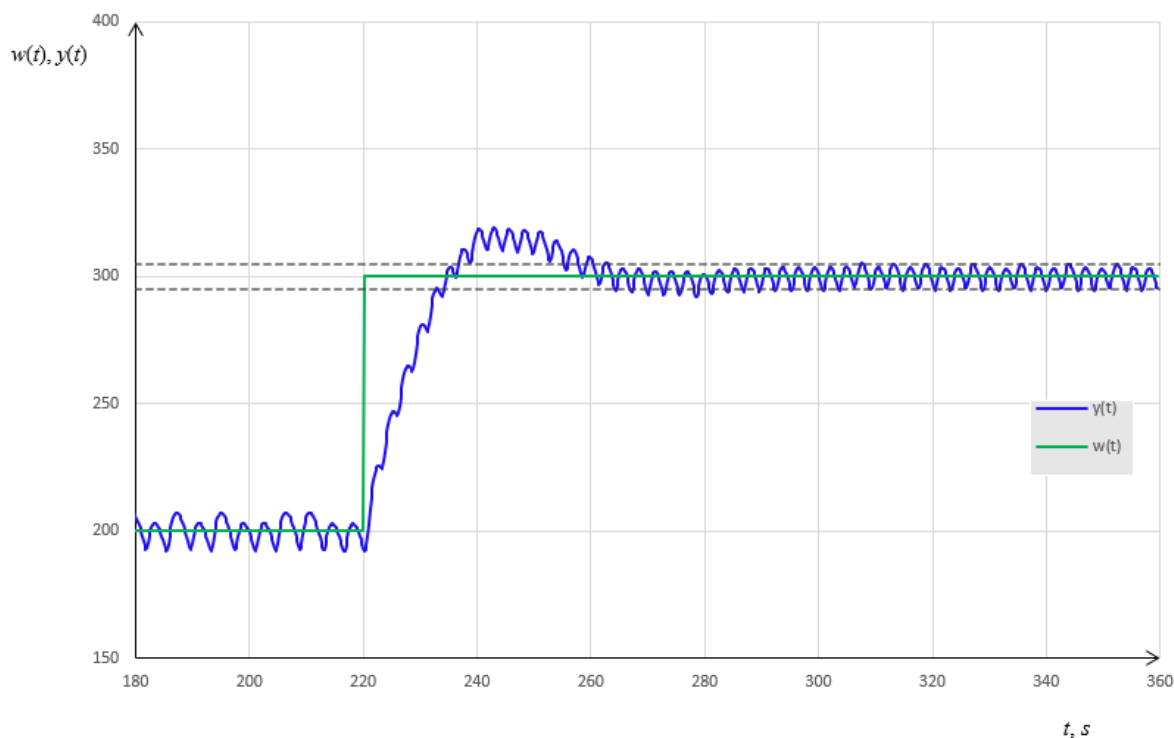
Obrázek 8.5 – Průběh regulace regulátoru KS 90-1, metody PMA Tune

Tab. 8.11 – Kritéria kvality regulátoru KS 90-1, metoda s využitím algoritmu PMA Tune

PMA Tune	Max. překmit, %	Doba odezvy, s	Doba ustálení, s
Pomalý	1,72	25,6	25,6
Normální	8,04	9,9	27,7
Rychlý	14,34	5,7	20,3

Tab. 8.12 – Parametry regulátoru KS 90-1, získané s využitím algoritmu PMA Tune

PMA	Proporcionální složka r_0	Integrační časová konstanta T_I	Derivační časová konstanta T_D	Spínací perioda T
Pomalý	12,5	7,65	6,24	0,59
Normální	7,14	5,47	3,85	0,59
Rychlý	5	3,35	2,74	0,59



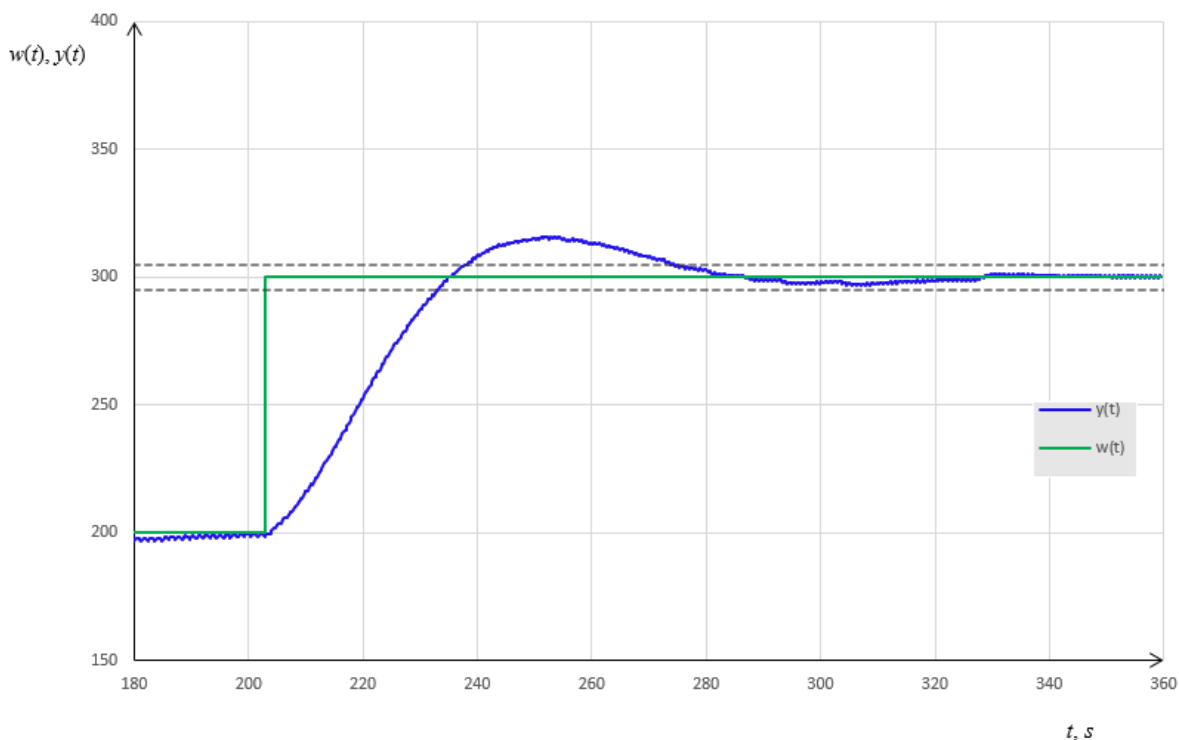
Obrázek 8.6 – Průběh regulace regulátoru KS 98-1 s odhadovanými parametry

Tab. 8.13 – Kritéria kvality regulátoru KS 98-1 s odhadovanými parametry

KS 98-1	Max. překmit, %	Doba odezvy, s	Doba ustálení, s
Odhadované parametry	19,04	14,6	72,2

Tab. 8.14 – Odhadované parametry regulátoru KS 98-1

KS 98-1	Proporcionální složka r_0	Integrační časová konstanta T_I	Derivační časová konstanta T_D	Spínací perioda T
Odhadované parametry	2	2	2	2



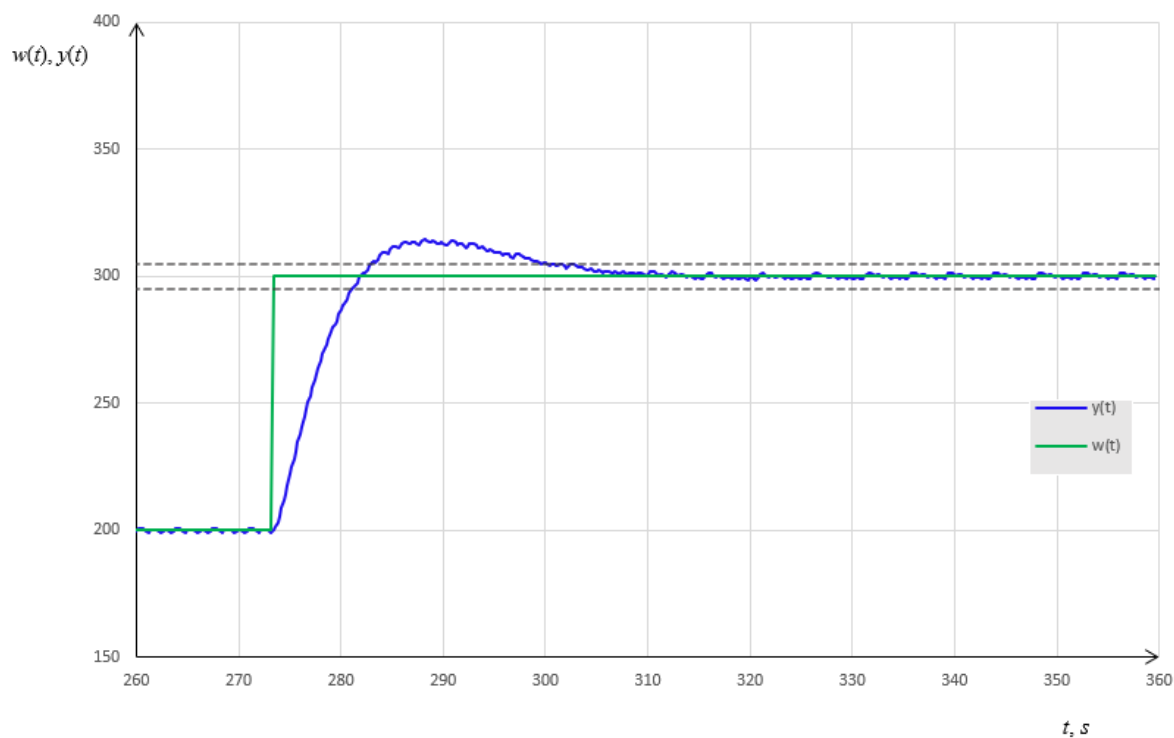
Obrázek 8.7 – Průběh regulace regulátoru KS 98-1, metoda funkčního bloku COUNTR

Tab. 8.15 – Kritéria kvality regulátoru KS 98-1, metoda funkčního bloku COUNTR

ET/KS98	Max. překmit, %	Doba odezvy, s	Doba ustálení, s
COUNTR	15,83	30,4	71

Tab. 8.16 – Parametry regulátoru KS 98-1, získané metodou funkčního bloku COUNTR

ET/KS98	Proporcionální složka r_0	Integrační časová konstanta T_I	Derivační časová konstanta T_D	Spínací perioda T
COUNTR	8,4	1,5	1,5	0,4



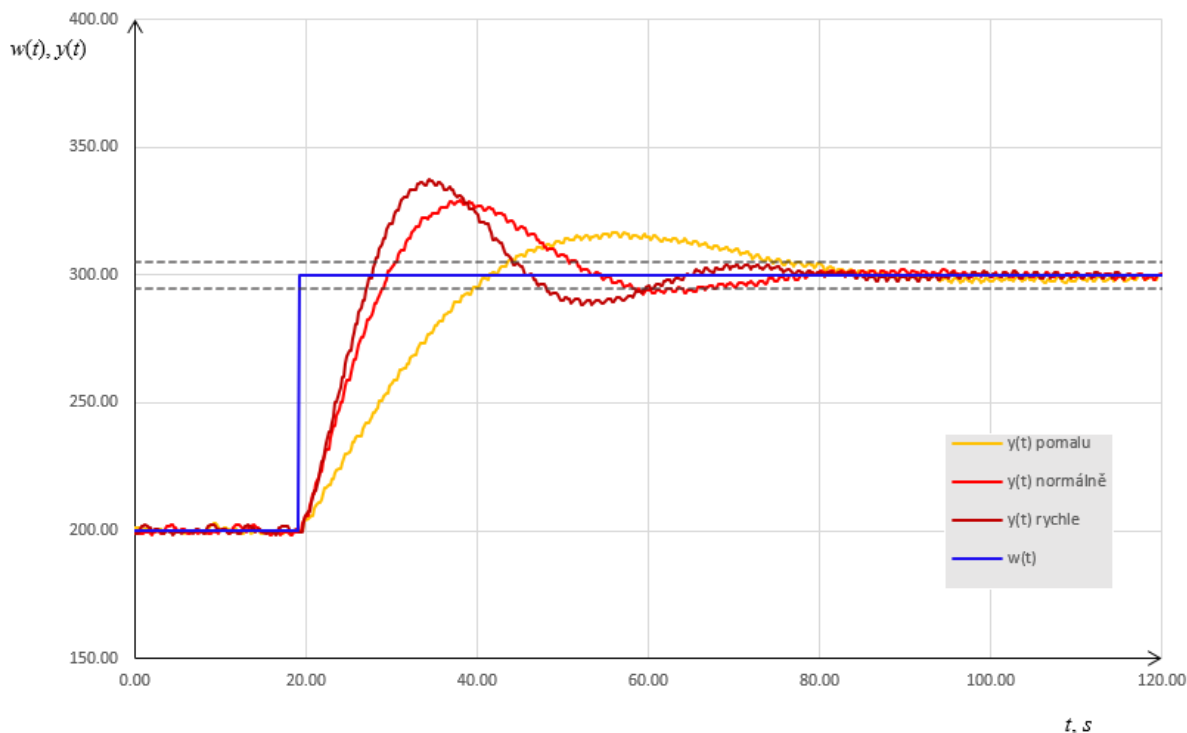
Obrázek 8.8 – Průběh regulace regulátoru KS 98-1, metoda funkčního bloku PIDMA

Tab. 8.17 – Kritéria kvality regulátoru KS 98-1, metoda funkčního bloku PIDMA

ET/KS98	Max. překmit, %	Doba odezvy, s	Doba ustálení, s
PIDMA	14,4	8,2	27

Tab. 8.18 – Parametry regulátoru KS 98-1, získané metodou funkčního bloku PIDMA

ET/KS98	Proporcionální složka r_0	Integrační časová konstanta T_I	Derivační časová konstanta T_D	Spínací perioda T
PIDMA	2,41	8,8	1,8	0,4



Obrázek 8.9 – Průběh regulace regulátoru KS 98-1, metody PMA Tune

Tab. 8.19 – Kritéria kvality regulátoru KS 98-1, metoda s využitím algoritmu PMA Tune

PMA Tune	Max. překmit, %	Doba odezvy, s	Doba ustálení, s
Pomalý	16,86	20,4	57,2
Normální	29,51	10,4	47
Rychlý	37,26	8,4	41

Tab. 8.20 – Parametry regulátoru KS 98-1, získané pomocí metod s využitím algoritmu PMA Tune

PMA	Proporcionální složka r_0	Integrační časová konstanta T_I	Derivační časová konstanta T_D	Spínací perioda T
Pomalý	5	4,7	3,9	0,6
Normální	5	3,4	2,7	0,6
Rychlý	10	7,7	6,2	0,6

ZÁVĚR

V této práci je řešena problematika samočinného nastavení parametrů regulátoru, konkrétně průmyslových regulátorů firmy PMA KS 90-1 a KS 98-1. Cílem práce bylo ověření metod samooptimalizace použitých v regulátorech KS90-1 a KS 98-1. Na závěr byly získané sady parametrů porovnávány podle kritérií kvality.

V teoretické části práce jsou vysvětlené základní pojmy týkající se regulace v průmyslové automatizaci. Zaměřena je na popis charakteristických částí regulačního obvodu, přesněji na problematiku PID regulátorů. Přes základní pojmy řízení procesů byly zmíněny i hlubší rozbory metod samočinného nastavení parametrů regulátorů. Popsány byly také průmyslové regulátory.

Praktická část práce obsahuje vyhodnocené průběhy metod samočinného nastavení parametrů a přechodové charakteristiky s parametry regulátoru získané z těchto metod. Regulátor KS 98-1 je volně programovatelný regulátor. Nabízená možnost volného programování byla využita za pomoci inženýrského softwaru ET/98.

Z výsledných kritérií kvality nelze bez bližšího definování regulované soustavy a vyžadovaného regulačního pochodu jednoznačně vybrat nejlepší metodu samooptimalizace. Samooptimalizační metody regulátoru KS 90-1 bez využití programu PMA Tune byly jednoznačně lepší. Tento rozdíl byl dán nižší náročností zvolené regulované soustavy, kdy potenciálu algoritmu programu PMA Tune je využito při složitějších regulovaných soustavách s dopravním zpožděním, driftem nebo i astatických regulovaných soustavách. U regulátoru KS 98-1 byly až na funkční blok PIDMA nalezeny vyrovnané parametry. KS 98-1 nabízí možnost výběru struktury PID regulátoru. Paralelní struktura PID regulátoru byla simulací jednoznačně nejvhodnější pro simulovanou soustavu.

LITERATURA

- ÅSTRÖM, T; K ÅSTRÖM. 1995. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. 2. The Instrumentation, Systems and Automation Society, 343 s. ISBN 1-55617-516-7.
- BOBÁL, V., BÖHM, J., FESSL, J., MACHÁČEK, J. 2005. *Self-tuning Controllers: Algorithms, Implementation and Application*, Londýn: Springer. 317 s. ISBN 978-1-85233-980-7.
- CVEJN J. 2007. *Řízení procesů*. [on line] Pardubice: Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky. Dostupné z:
http://matlab.fe.i.tuke.sk/ons/doc/Cvejn_rizeni_procesu.pdf
- HLAVA, J. 2000. *Prostředky automatického řízení II analogové a číslicové regulátory, elektrické pohony, průmyslové komunikační systémy*. Praha: ČVUT, 160 s. ISBN 1-55617-516-7.
- KONFRŠT P. 2014. *Metody samočinného nastavování PID regulátorů*. Pardubice: Diplomová práce. Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky. 76 s.
- KLÁN, P. 2009. *Komerční využívané pokročilé metody nastavování PID regulátorů*. Automa. Roč. 15, č. 12 (2009). [on line]. Praha: Ústav informatiky AV ČR. ISSN 1210-9592. Dostupné z https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/40134.pdf
- PROFESS spol. s.r.o. 2006. *Multifunkční regulátor KS 98-1, Příručka uživatele*. [on line]. Plzeň. 234 s. Dostupné na <http://www.profess.cz/dynamic/produkty/dokument/KS98-1N.pdf>
- PROFESS spol. s.r.o. 2009. *KS 90-1 / KS 92-1, Průmyslové procesní regulátory*. [on line]. Plzeň. 8 s. Dostupné na <https://www.profess.cz/dynamic/produkty/dokument/KS90-1.pdf>
- PROFESS spol. s.r.o. 2011a. *KS 98-1, Multifunkční regulátor*. [on line]. Plzeň. 12 s. Dostupné na <http://www.profess.cz/dynamic/produkty/dokument/KS98-1.pdf>
- PROFESS spol. s.r.o. 2011b. *Průmyslové regulátory KS 90-1 a KS 92-1, Návod k použití*. [on line]. Plzeň. 76 s. Dostupné na <http://www.profess.cz/dynamic/produkty/dokument/KS90-1N.pdf>
- REX CONTROLS. 2003. *Program pro automatické nastavování PID regulátorů: PMATune*. 25 s.

ROUBAL J: 2009. *Stavový popis, linearizace*. [on line] Košice: Technická Univerzita Košice.

Dostupné z: http://matlab.fei.tuke.sk/orhs/subory/podklady/Roubal_stavovy_priestor.pdf

PŘÍLOHY

A-CD

Příloha k bakalářské práci
SAMOČINNÉ NASTAVOVÁNÍ PARAMETRŮ REGULÁTORŮ
KS 90-1 A KS 98-1
Tomáš Pácal

CD

Obsah

- 1 Text bakalářské práce ve formátu PDF