

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

FAKULTA CHEMICKÉJ A POTRAVINÁRSKEJ TECHNOLOGIE

ÚSTAV INFORMATIZÁCIE, AUTOMATIZÁCIE A MATEMATIKY

BAKALÁRSKA PRÁCA

Bratislava 2010

Jana Mičáková

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

RIADENIE SÚSTAV S DOPRAVNÝM ONESKORENÍM

Záverečná práca bakalárskeho štúdia

Vedúci bakalárskej práce:

Ing. Anna Vasičkaninová

Autor:

Jana Mičáková

Bratislava 2010

Zadanie bakalárskej práce

Špecifikácia:

Modelovanie procesov s dopravným oneskorením.

Analáza možností riadenia procesov dopravným oneskorením.

Návrh regulátorov vybranými metódami.

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcej bakalárskej práce Ing. Anne Vasičkaninovej za vynikajúce usmerňovanie pri tvorbe práce a za jej odborné rady a pripomienky.

Súhrn

Táto bakalárska práca sa zaoberá riadením systémov s dopravným oneskorením. Sú tu analyzované možnosti riadenia procesov s dopravným oneskorením. Prvá časť vysvetľuje niektoré základné pojmy z danej problematiky. Cieľom práce je porovnanie jednotlivých aproximácií dopravného oneskorenia pri riadení systémov prvého a druhého rádu s dopravným oneskorením a vytvorenie grafického užívateľského rozhrania v programovom prostredí MATLAB. V druhej časti sa práca zameriava návrhom regulátorov vybranými metódami a ich simulačným overením. V práci sú uvedené vzťahy pre niektoré aproximácie dopravného oneskorenia, tabuľky na výpočet parametrov regulátorov rôznymi metódami, simulačné schémy a simulácie vykonané už v spomínanom programovom prostredí MATLAB.

Kľúčové slová: dopravné oneskorenie,
 regulátor,
 riadenie

Abstract

This bachelor work deals with the system control of the delay. There are analyzed the possibilities of control processes with time delay. The first section explains some basic concepts of the problem. The work is to compare different approximation of time delays in the control systems of the first and second order with time delay and the creation of GUI programming in MATLAB. In the second part of the work focuses draft regulators selected methods and simulation verification. The work for the relationship to some approximation of the transport delay table to calculate the parameters of controllers by different methods, simulation and simulation scheme that has already made in that program MATLAB.

Keywords: time delay,
regulator,
system control

Obsah

Zoznam obrázkov	8
Zoznam tabuliek	9
Zoznam symbolov a skratiek	10
1. Úvod	12
2. Modelovanie procesov s dopravným oneskorením	13
2.1. Základné pojmy	13
2.2. Identifikácia dynamických systémov s dopravným oneskorením	17
2.3. Modely procesov	20
3. Analýza možností riadenia procesov s dopravným oneskorením, návrh regulátorov vybranými metódami a ich simulačné overenie	24
3.1. Aproximácie dopravného oneskorenia	24
3.2. Experimentálne metódy	30
3.3. Riadenie s vnútorným modelom IMC	42
4. Záver	49
Zoznam použitej literatúry	50

Zoznam obrázkov

obr. 1: Všeobecná schéma na riadenie systémov s dopravným oneskorením	13
obr. 2: Schéma integrálnych ukazovateľov riadenia kvality	16
obr. 3: Prechodová charakteristika so znázornenými kritériami kvality	17
obr. 4: PCH systému prvého rádu s dopravným oneskorením	18
obr. 5: PCH systému vyššieho rádu s DO s dotyčnicou v inflexnom bode	19
obr. 6: PCH systému vyššieho rádu ako prvého rádu s DO	20
obr. 7: Schéma riadenia systémov aproximáciou dopravného oneskorenia	24
obr. 8: PCH systémov prvého a druhého rádu Taylorovým rozvojom	26
obr. 9: PCH systémov 1. a 2. rádu Maclaurinovým rozvojom upravenej funkcie	28
obr. 10: PCH systémov 1. a 2 rádu Padého aproximáciou	29
obr. 11: Schéma riadenia systémov s dopravným oneskorením	31
obr. 12: Závislosti IAE a ISE od času pre P, PI, PID regulátory (ZNM)	34
obr. 13: Návrh regulačných obvodov, priebehy regulačných odchýliek (ZNM)	34
obr. 14: Závislosti IAE a ISE od času pre P, PI, PID, PD regulátory (CCM)	36
obr. 15: Návrh regulačných obvodov, priebehy regulačných odchýliek (CCM)	36
obr. 16: Závislosti IAE a ISE od času pre PI regulátor (HM)	37
obr. 17: Návrh regulačného obvodu, priebeh regulačnej odchýlky (HM)	38
obr. 18: Závislosti IAE a ISE od času pre P, PI, PID regulátory (CHRM)	39
obr. 19: Návrh regulačných obvodov, priebehy regulačných odchýliek (CHRM)	40
obr. 20: Závislosti IAE a ISE od času pre P, PID regulátory (SMM)	41
obr. 21: Návrh regulačných obvodov, priebehy regulačných odchýliek (SMM)	42
obr. 22: Štruktúra s vnútorným modelom	43
obr. 23: Všeobecný blokový diagram IMC štruktúry	44
obr. 24: Zjednodušený blokový diagram IMC štruktúry	45
obr. 25: Blokový diagram pre diskusiu o vnútornej stabilite klasickej štruktúry	46
obr. 26: Závislosti IAE a ISE od času pre PI, PI(spres.), PID regulátory (IMC)	48
obr. 27: Návrh regulačných obvodov, priebehy regulačných odchýliek (IMC)	48

Zoznam tabuliek

Tab. 1: Tabuľka na výpočet parametrov regulátora ZNM	33
Tab. 2: Tabuľka hodnôt ukazovateľov riadenia kvality (ZNM)	33
Tab. 3: Tabuľka na výpočet parametrov regulátora CCM	35
Tab. 4: Tabuľka hodnôt ukazovateľov riadenia kvality (CCM)	35
Tab. 5: Tabuľka na výpočet parametrov regulátora HM	37
Tab. 6: Tabuľka hodnôt ukazovateľov riadenia kvality (HM)	37
Tab. 7: Tabuľka na výpočet parametrov regulátora CHRM	38
Tab. 8: Tabuľka hodnôt ukazovateľov riadenia kvality (CHRM)	39
Tab. 9: Tabuľka na výpočet parametrov regulátora SMM	41
Tab. 10: Tabuľka hodnôt ukazovateľov riadenia kvality (SMM)	41
Tab. 11: Tabuľka na výpočet parametrov regulátora s DO s IMC	47
Tab. 12: Tabuľka hodnôt ukazovateľov riadenia kvality s IMC	47

Zoznam symbolov a skratiek

PF	Prechodová funkcia
PCH	Prechodová charakteristika
$\delta_{\max}$	Maximálny prekmit
t_{reg}	Čas regulácia
t_u	Čas prietahu
t_n	Čas nábehu
TRO, $e(\infty)$	Trvalá regulačná odchýlka
IAE, ISE	Integrálne ukazovatele riadenia kvality
D	Dopravné oneskorenie
DO	Dopravné oneskorenie
$G(s)$	Prenos systému
$G_R(s)$	Prenos regulátora
Z	Zosilnenie prenosu
T	Časová konštanta prenosu
n	Rád prenosu
R	Maximálna strmosť prechodovej prechodovej charakteristiky
P	Proporcionálny regulátor
PI	Proporcionálno – integračný regulátor
PID	Proporcionálno – integračno – derivačný regulátor
τ	Normalizované oneskorenie
T	Doba nábehu
D	Doba prietahu
Z_0	Normalizované zosilnenie
Z_R	Zosilnenie regulátora
T_I	Integračná časová konštanta
T_D	Derivačná časová konštanta
ZNM	Ziegler – Nicholsonova metóda
CCM	Cohen – Coononova metóda
HM	Haalmanova metóda

CHRM	Chien – Hrones – Reswickova metóda
SMM	Smith – Murrillova metóda
IMC	Riadenie s vnútorným modelom
G_p	Prenosová funkcia procesu
G_m	Prenosová funkcia meracieho zariadenia
G_{IMC}	Prenosová funkcia regulátora s vnútorným modelom
w	Referenčný signál
$\bar{d}$	Spätnoväzbový signál
d	Porucha
$\bar{y}$	Výstup z modelu
y	Výstup z procesu
λ	Filtračná časová konštanta

1. Úvod

Témou bakalárskej práce je riadenie sústav s dopravným oneskorením. Nepriaznivý vplyv dopravného oneskorenia na stabilitu a kvalitu regulácie v spätnoväzbových regulačných obvodoch je dostatočne známy.

Dopravné oneskorenie je charakteristické pre procesy dopravy látok, pre tzv. prietokové kontinuálne priemyselné procesy, ako napríklad rúrkové pece a výmenníky tepla, rúrkové chemické reaktory, ale aj pri vykurovacích sústavách budov [3].

Výrobné zariadenia s časovým oneskorením často nemôžu byť riadené použitím bežných regulátorov navrhnutých bez zváženia prítomnosti dopravného oneskorenia. V systéme s dopravným oneskorením dochádza k časovému posunutiu medzi určitou príčinou a jej dôsledkom, a tým sa zhoršujú vlastnosti regulačného obvodu.

So zväčšovaním hodnoty dopravného oneskorenia sa ukazuje aj nestabilita systému [2].

Cieľom bakalárskej práce je porovnanie jednotlivých aproximácií dopravného oneskorenia pri riadení systémov prvého a druhého rádu s dopravným oneskorením a taktiež sa práca zameriava návrhom regulátorov vybranými metódami a ich simulačným overením. Práca sa ďalej zaoberá riadením s vnútorným modelom IMC.

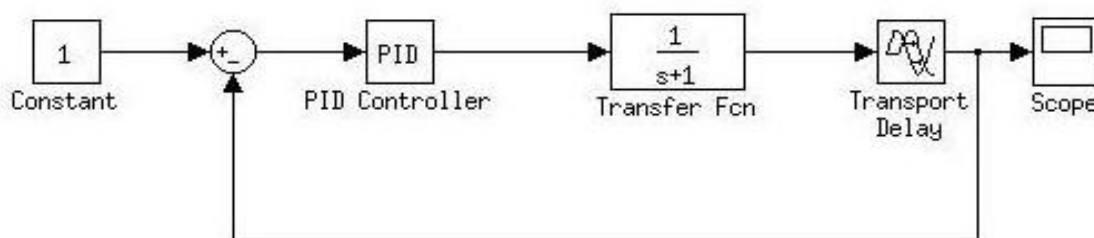
2. MODELOVANIE PROCESOV S DOPRAVNÝM ONESKORENÍM

2.1. Základné pojmy

Dopravné oneskorenie

Dopravné oneskorenie je jav, ktorý sa v zariadeniach chemických a potravinárskych technológií vyskytuje veľmi často. Objavuje sa vždy, ak dochádza k transportu látky. Vzniká v dôsledku konečnej rýchlosti pohybu materiálov a konečnej rýchlosti prenosu signálov. Je definované ako čas transportu látky z technologického zariadenia do automatického analyzátora, ktorý býva spojený s technologickým zariadením potrubím. Týmto potrubím sa do automatického analyzátora dopravuje analyzovaná látka z technologického zariadenia.

Pre systémy s dopravným oneskorením, u ktorých dochádza k časovému oneskoreniu signálu (informácie, látky), čo zhoršuje vlastnosti regulačného obvodu, musíme vhodne navrhnuť regulátor, aby sa zabezpečila stabilita regulačného obvodu, ktorá sa posudzuje na základe kritérií stability, alebo pomocou prechodovej charakteristiky.



obr. 1: Všeobecná schéma na riadenie systémov s dopravným oneskorením

Prechodová funkcia (PF), prechodová charakteristika (PCH)

Prechodová funkcia (PF) je definovaná ako matematický opis reakcie systému na jednotkovú skokovú zmenu vstupnej veličiny 1 (t) pri nulových začiatočných podmienkach.

Prechodová charakteristika (PCH) je grafické znázornenie prechodovej funkcie (PF).

Pre systém, ktorý je opísaný prenosom $G(s)$ platí:

$$Y(s) = G(s)U(s) \tag{1}$$

Prechodová funkcia je vlastne originálom ku $G(s)/s$, a naopak $G(s)/s$ je obrazom prechodovej funkcie.

Prechodové funkcie sú nositeľom vlastností dynamických procesov. Na základe vyhodnotenia prechodových charakteristík dokážeme určiť štruktúru a koeficienty modelu pre kmitavé, nekmitavé, lineárne a nelineárne procesy.

Z prechodovej charakteristiky určíme matematický model riadeného procesu (prenosovú funkciu systému) a z neho potom vypočítame koeficienty spojitého alebo diskrétnych regulátorov.

Stabilita dynamických systémov

Dynamický systém je stabilný, ak majú všetky jeho póly (korene menovateľa prenosu) zápornú reálnu časť. Systém je na hranici stability, ak má aspoň jeden pól s nulovou reálnou časťou a je nestabilný, ak má aspoň jeden pól s kladnou reálnou časťou.

Systém je minimálne fázový, ak majú všetky jeho nuly zápornú reálnu časť, inak je neminimálne fázový, a ak je v čitateli prenosu len konštanta, potom je minimálne fázový.

Systém je periodický (kmitavý), ak má komplexné póly, a je aperiodický (nekmitavý), ak má len reálne póly [1].

Časové ukazovatele riadenia kvality (sledujú priebeh riadenia v čase)

Maximálny prekmit (maximálne preregulovanie) $\delta_{\max}$ udáva v percentách veľkosť maximálnej odchýlky výstupnej veličiny od jej ustálenej hodnoty

$$\delta_{\max} = \frac{y_{\max} - y_{\infty}}{y_{\infty} - y_0} 100 \% \quad (2)$$

Čas regulácie t_{reg} je definovaný ako čas, po ktorom regulačná odchýlka nebude väčšia ako stanovená hodnota, teda čas, za ktorý sa riadená veličina uriadí so žiadanou presnosťou.

Čas prietahu t_u je čas, ktorý získame na základe priesečníka rovnobežky s časovou osou v počiatočnej hodnote výstupu a dotýčnice trajektórie v inflexnom bode.

Čas nábehu t_n určuje čas, ktorý získame na základe priesečníka rovnobežky s časovou osou v ustálenej hodnote výstupu a dotýčnice trajektórie v inflexnom bode.

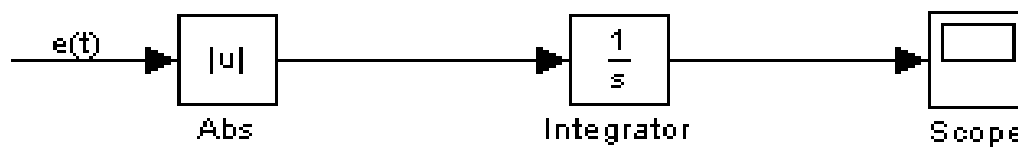
Trvalá regulačná odchýlka TRO $e(\infty)$ je definovaná ako rozdiel medzi žiadanou veličinou w a riadeným výstupom y v novom ustálenom stave. Je nenulová v prípade použitia regulátora bez integračnej zložky.

$$e(\infty) = w(\infty) - y(\infty) \quad (3)$$

Integrálne ukazovatele riadenia kvality

IAE:

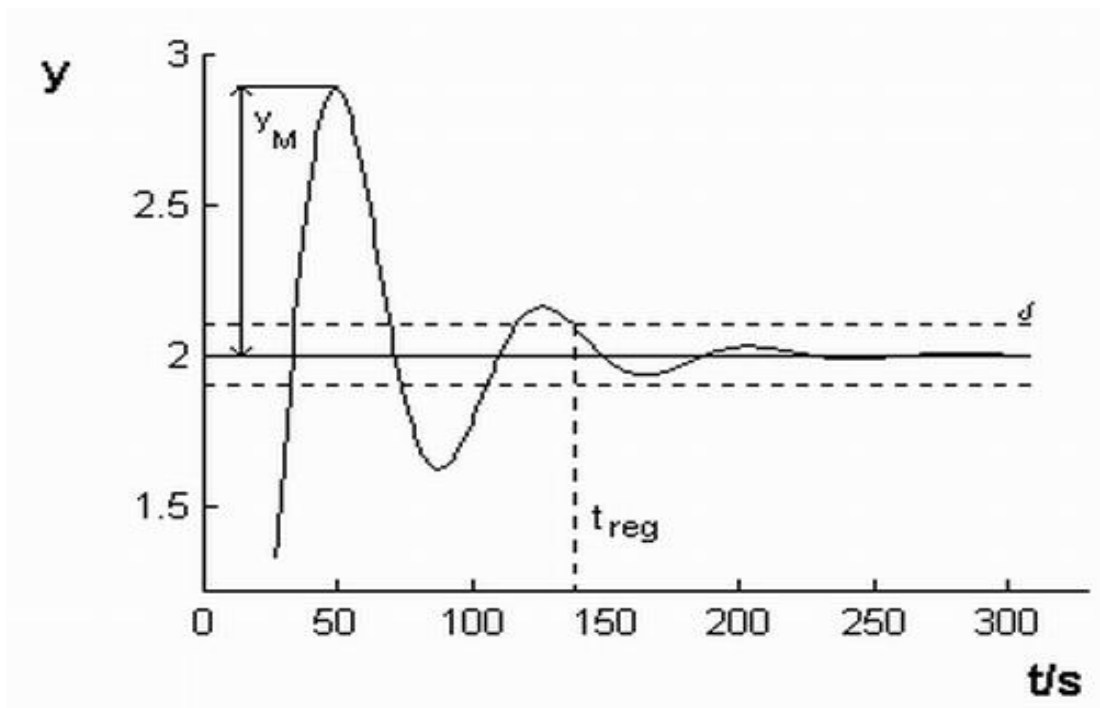
$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (4)$$



obr. 2: Schéma integrálnych ukazovateľov riadenia kvality

ISE:

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (5)$$



obr. 3: Prechodová charakteristika so znázornenými kritériami kvality

2.2. Identifikácia dynamických systémov s dopravným oneskorením

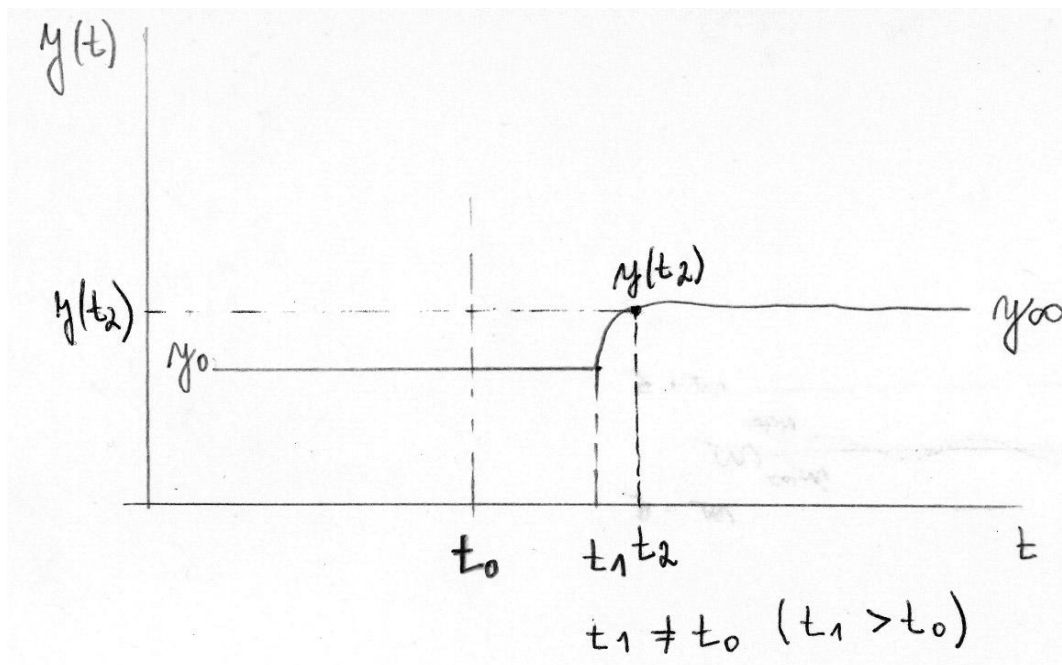
Identifikácia systému prvého rádu s dopravným oneskorením

Diferenciálna rovnica: $a_1 y'(t) + a_0 y(t) = b_0 u(t-D)$ (6)

Prenos:

$$G(s) = \frac{b_0}{a_1 s + a_0} e^{-Ds} / \left(\frac{1}{a_0} \right) \Rightarrow \frac{Z}{Ts + 1} e^{-Ds} \quad (7)$$

Identifikuje sa Z-zosilnenie, T-časová konštanta, D-dopravné oneskorenie



obr. 4: PCH systému prvého rádu s dopravným oneskorením

$$Z = \frac{y_{\infty} - y_0}{u_{\infty} - u_0} \quad (8)$$

$$y(t_2) = 0,63(y_{\infty} - y_0) + y_0 \quad (9)$$

$T = t_2 - t_1$, prenos je rýchlejší tým, čím je časová konštanta menšia

$$D = t_1 - t_0$$

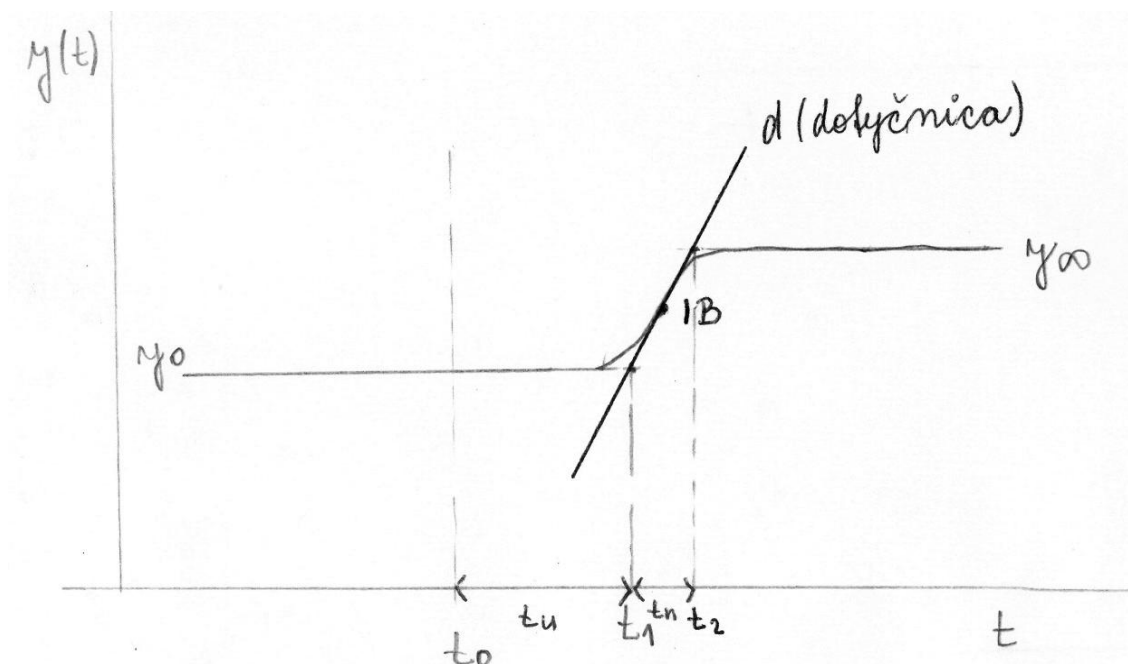
Identifikácia systému vyššieho rádu s dopravným oneskorením

$$n > 1$$

$$\text{Diferenciálna rovnica: } a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + a_0 y(t) = b_0 u(t-D) \quad (10)$$

Prenos:

$$G(s) = \frac{b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots a_0} e^{-Ds} \quad (11)$$



obr. 5. PCH systému vyššieho rádu s DO s dotyčnicou v inflexnom bode

Identifikácia systému vyššieho rádu ako prvého rádu s dopravným oneskorením

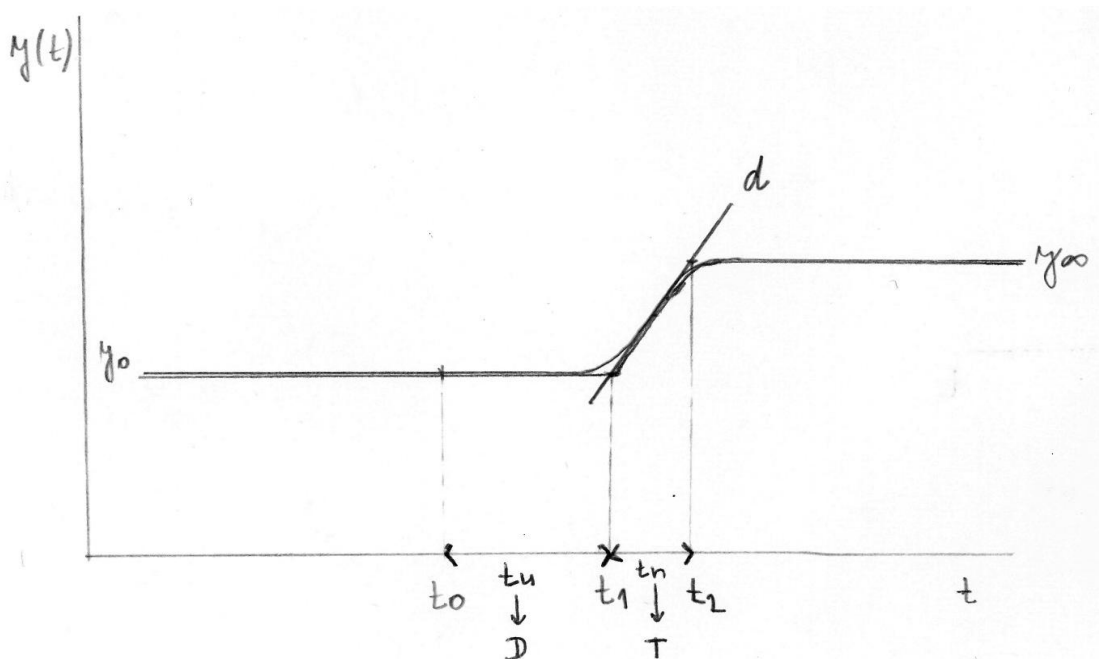
Prenos:

$$G(s) = \frac{Z}{(Ts + 1)^n} e^{-Ds} \quad (12)$$

Pre prvý rád: $T = g(n)t_n$, $D = t_u$, $n=1$ (predpísané)

T: $T = g(1)t_n = t_n$

D: $D = (f_s - f(1))t_n = (f_s - 0)t_n = f_s \cdot t_n = (t_u/t_n)t_n = t_u$



obr. 6: PCH systému vyššieho rádu ako prvého rádu s DO

2.3. Modely procesov

Technologické procesy, ktoré chceme riadiť, sú väčšinou veľmi zložité, nelineárne a premenné v čase. Nádej, že získame ich presný matematický model vo všetkých pracovných režimoch, je nereálna.

Dlhoročné skúsenosti potvrdzujú, že napr. pre návrh rozumného PID regulátora nám obvykle stačí poznať dve alebo tri charakteristické čísla procesu (doba prietahu a nábehu, statické zosilnenie).

Podobné závery môžeme spraviť aj na základe populárnej Zieglerovej-Nichosovej metódy, ktorá pre návrh PID regulátora využíva iba dve, tzv. kritické hodnoty (kritické zosilnenie a kritickú frekvenciu). Dokonca sa zistilo, že pre vyhovujúci návrh PID regulátora stačí poznať len jediný bod frekvenčnej charakteristiky

riadeného systému s fázovým oneskorením 135° . Uvažujeme teda, že pre návrh PID regulátora sa môžeme sústrediť na modely, ktoré obsahujú len dva alebo tri parametre, musia však byť relatívne presné vo frekvenčnej oblasti okolo fázového oneskorenia 135° [5].

Klasifikácia procesov

Procesy podľa tvaru prechodovej charakteristiky členíme na statické, astatické (procesy s integráciou), neminimálne fázové, kmitavé a taktiež podľa pomeru medzi dobou prietahu a dobou nábehu na dobre a zle regulovateľné [5].

Ak je systém s prenosovou funkciou $G(s)$ stabilný, teda korene menovateľa prenosu majú zápornú reálnu časť, ustálenú hodnotu výstupnej veličiny $y(\infty)$ potom možno vypočítať, napr. pomocou vety o konečnej hodnote

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \lim_{s \rightarrow 0} G(s) = \frac{b_0}{a_0} \quad (13)$$

Toto platí pre statické systémy a zosilnenie systému je definované vzťahom

$$Z = \frac{b_0}{a_0} \quad (14)$$

Astatické systémy majú nulový koreň menovateľa (t.j. koeficient $a_0=0$)

Z nameranej prechodovej charakteristiky získame všetky potrebné informácie pre takúto klasifikáciu, prípadne z frekvenčnej charakteristiky procesu. Najviac vyskytujúca sa prechodová charakteristika pri riadených procesoch je typická monotónna krivka S statického systému. Jej začiatok môžeme opísať prenosom s dvoma parametrami:

$$G(s) = \frac{R}{s} e^{-Ds} = \frac{a}{Ds} e^{-Ds}, \quad (15)$$

kde R zodpovedá maximálnej strmosti prechodovej charakteristiky.

Na opis celej prechodovej charakteristiky môžeme použiť trojparametrový prenos:

$$G(s) = \frac{Z_0 e^{-Ds}}{Ts + 1} \quad (16)$$

Prvý prenos používa Zieglerova-Nicholsova metóda na návrh P, PI, PID regulátora a druhý prenos je najčastejšie používaný model na návrh PID regulátora. [5]

Charakteristické čísla statického procesu

Na zistenie, či je daný proces dobre alebo zle regulovateľný a taktiež pre voľbu vhodného typu regulátora a približné určenie jeho parametrov je dôležité zaviesť tieto bezrozmerné charakteristické čísla procesu.

Normalizované oneskorenie, definované vzťahom

$$\tau = \frac{D}{D+T}, \quad (17)$$

kde D je doba prietahu (fixné alebo zdanlivé dopravné oneskorenie) a T je doba nábehu.

τ vždy leží v intervale $<0,1>$. Malé hodnoty τ zodpovedajú dobre a veľké zle regulovateľným procesom (medza je približne $\tau = 0,4$).

Normalizované zosilnenie Z je definované vzťahom

$$Z = \frac{Z_{180}}{Z_0} \quad (18)$$

kde Z_0 je statické zosilnenie a Z_{180} je zosilnenie na frekvencii ω_{180} , pri ktorej dochádza k fázovému oneskoreniu 180° .

Normalizované zosilnenie leží tiež na intervale $<0,1>$ a malé hodnoty zodpovedajú dobre a veľké zle regulovateľným procesom.

Na relatívne presný výpočet parametrov regulátora statického systému stačí znalosť troch charakteristických čísel D, T a Z [5].

Typy regulátorov

Dvojpolohový regulátor – je najjednoduchší a najlacnejší, nachádza sa napr. v chladničkách, žehličkách

Proporcionálny regulátor (P) – je vhodný napr. na reguláciu tlaku, výšky

$$G_R(s) = Z_R \quad (19)$$

Interačný regulátor (PI) – používa sa na odstránenie trvalej regulačnej odchýlky TRO zavedením integrátora (akčný zásah sa bude meniť dovtedy, kým nebude platiť $TRO=0$)

$$G_R(s) = Z_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) \quad (20)$$

Kde $P=Z_R$, $I=Z_R/T_I$

Derivačný regulátor (PID) – vzniká spojením P, I, a D regulátora.

$$G_R(s) = Z_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (21)$$

Prenos PID regulátora v MATLABe

$$G_R(s) = P + \frac{I}{s} + Ds \quad (22)$$

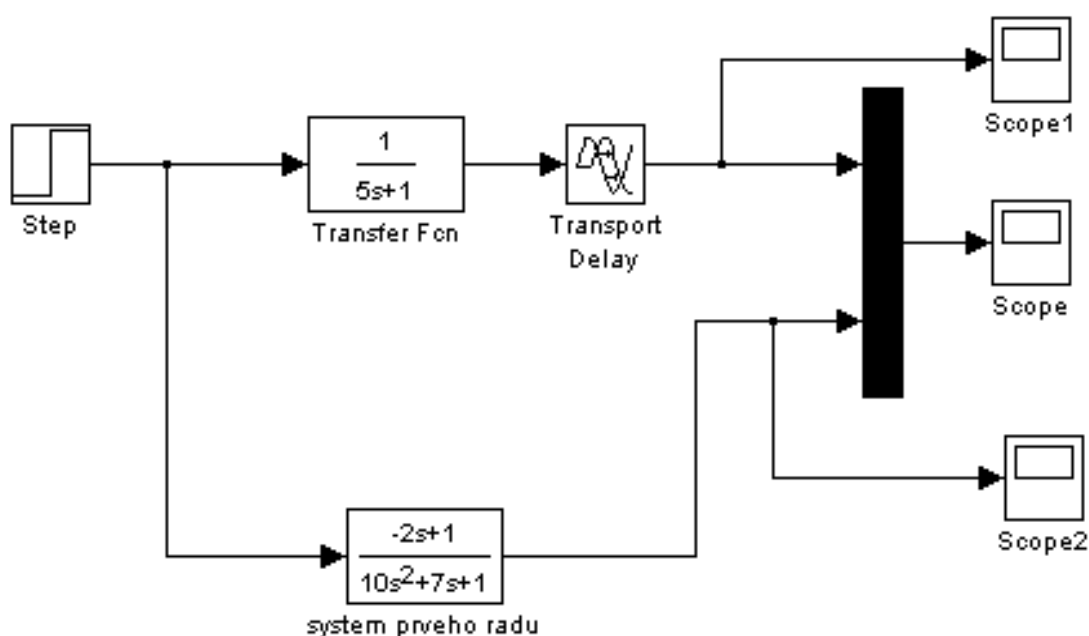
Kde $P=Z_R$, $I=Z_R/T_I$, $D=Z_R T_D$

Proporcionálno-integračno-derivačné (PID) regulátory sú najpoužívanéjšie regulátory v priemysle. Až 95 % všetkých regulačných algoritmov je typu PID. Napriek nepochybnej jednoduchosti PID regulátorov sú s nimi v priemysle problémy. Väčšina regulačných slučiek nie je vhodne navrhnutá alebo vyladená [5].

3. ANALÝZA MOŽNOSTÍ RIADENIA PROCESOV S DOPRAVNÝM ONESKORENÍM, NÁVRH REGULÁTOROV VYBRANÝMI METÓDAMI A ICH SIMULAČNÉ OVERENIE

3.1. Aproximácie dopravného oneskorenia

Pre analýzu a syntézu regulačných obvodov, ktoré obsahujú systém s dopravným oneskorením, sa často používajú aproximácie prenosu člena dopravného oneskorenia, pomocou ktorých získame prenos systému vyššieho rádu, ale bez dopravného oneskorenia.



obr. 7: Schéma riadenia systémov aproximáciou dopravného oneskorenia

Taylorov rozvoj čitateľa

$$e^{-2s} \approx 1 - Ds + \frac{D^2}{2!} s^2 - \frac{D^3}{3!} s^3 + \dots \quad (23)$$

Taylorov rozvoj menovateľa

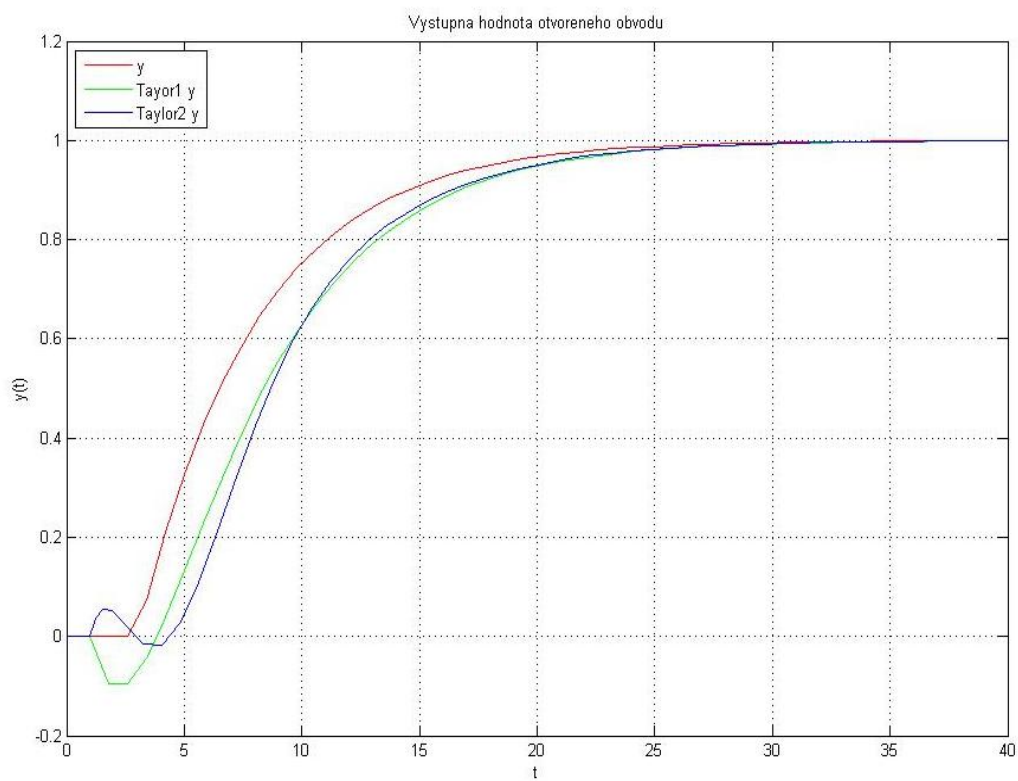
$$e^{-2s} \approx \frac{1}{1 + Ds + \frac{D^2}{2!} s^2 + \frac{D^3}{3!} s^3 + \dots} \quad (24)$$

Systém prvého rádu:

$$F(s) = \frac{Z}{(Ts + 1)^n} e^{-Ds} = \frac{1}{5s + 1} e^{-2s} = \frac{1}{5s + 1} \frac{1 - 2s}{1 + 2s} = \frac{-2s + 1}{10s^2 + 7s + 1} \quad (25)$$

Systém druhého rádu:

$$F(s) = \frac{1}{5s + 1} \frac{1 - 2s + 2s^2}{1 + 2s + 2s^2} = \frac{2s^2 - 2s + 1}{10s^3 + 12s^2 + 7s + 1} \quad (26)$$



obr. 8: PCH systémov prvého a druhého rádu Taylorovým rozvojom

Červená krivka predstavuje pôvodnú prechodovú charakteristiku, zelenou je znázornená prechodová charakteristika Taylorovým rozvojom prvého rádu a modrá krivka reprezentuje systém druhého rádu.

Maclaurinov rozvoj upravenej funkcie

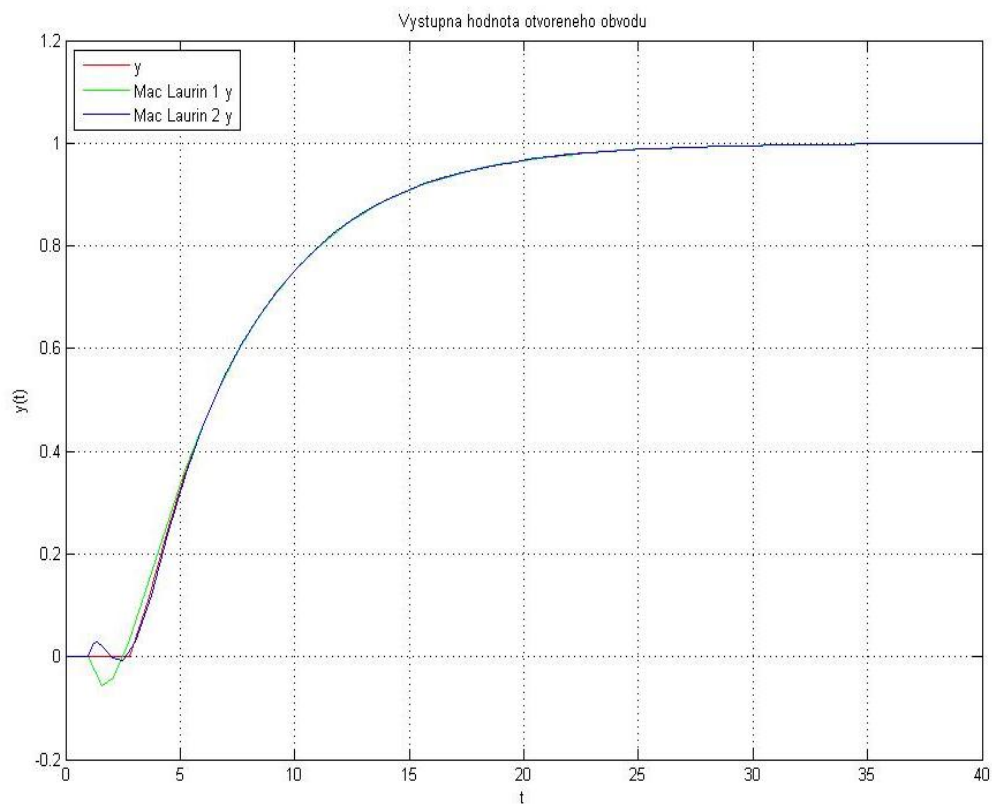
$$e^{-2s} \approx \frac{1 - \frac{D}{2}s + \frac{(\frac{D}{2})^2}{2!}s^2 - \frac{(\frac{D}{2})^3}{3!}s^3 + \dots}{1 + \frac{D}{2}s + \frac{(\frac{D}{2})^2}{2!}s^2 + \frac{(\frac{D}{2})^3}{3!}s^3 + \dots} \quad (27)$$

System prvého rádu:

$$F(s) = \frac{1}{5s+1} \frac{1-s}{1+s} = \frac{-s+1}{5s^2+6s+1} \quad (28)$$

System druhého rádu:

$$F(s) = \frac{1}{5s+1} \frac{s^2-2s+2}{s^2+2s+2} = \frac{s^2-2s+2}{5s^3+11s^2+12s+2} \quad (29)$$



obr. 9: PCH systémov 1. a 2. rádu Maclaurinovým rozvojom upravenej funkcie

Padého aproximácia

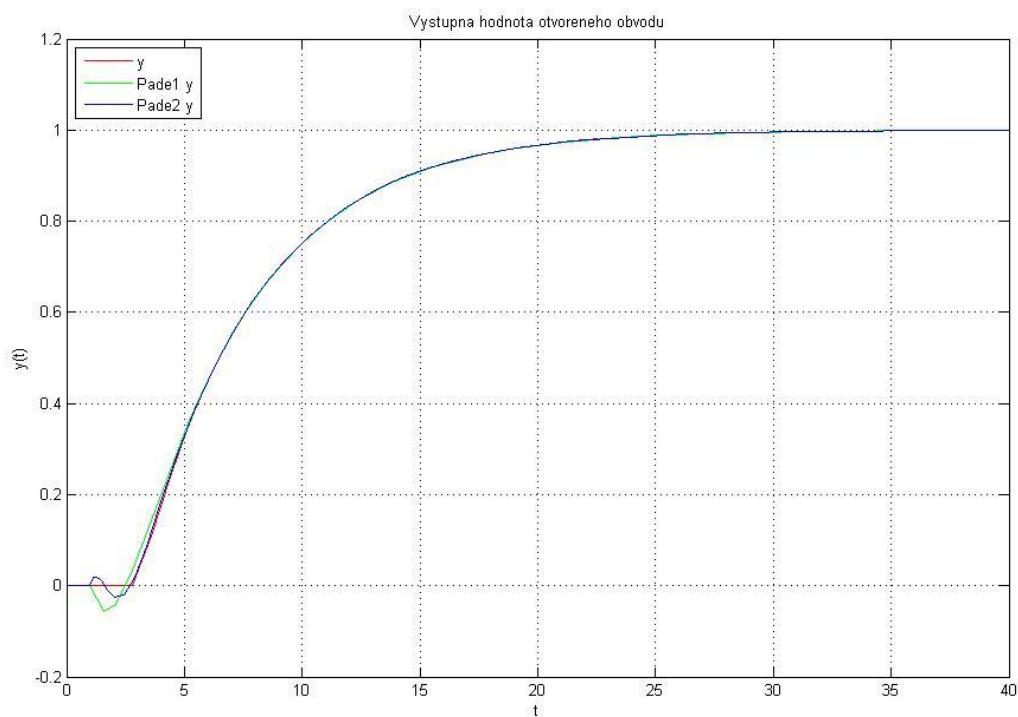
$$e^{-2s} \approx \frac{1 - \frac{D}{2}s + \frac{D^2}{12}s^2 - \frac{D^3}{120}s^3 + \dots}{1 + \frac{D}{2}s + \frac{D^2}{12}s^2 + \frac{D^3}{120}s^3 + \dots} \quad (30)$$

Systém prvého rádu:

$$F(s) = \frac{1}{5s+1} \frac{1-s}{1+s} = \frac{-s+1}{5s^2+6s+1} \quad (31)$$

Systém druhého rádu:

$$F(s) = \frac{1}{5s+1} \frac{s^2 - 3s + 3}{s^2 + 3s + 3} = \frac{s^2 - 3s + 3}{5s^3 + 16s^2 + 18s + 3} \quad (32)$$



obr. 10: PCH systémov 1. a 2 rádu Padého aproximáciou

Metódy syntézy regulátorov

Pre nastavovanie parametrov regulátorov sa používajú rôzne metódy, ktoré pracujú s prenosovou funkciou riadeného procesu – analytické metódy, alebo s nameranými charakteristikami (prechodová charakteristika, kritické zosilnenie, atď.) – experimentálne metódy.

Analytické metódy predpokladajú znalosť prenosu riadeného systému. Keďže ho obyčajne nepoznáme presne, využívajú sa skôr len na prvotný odhad parametrov regulátora.

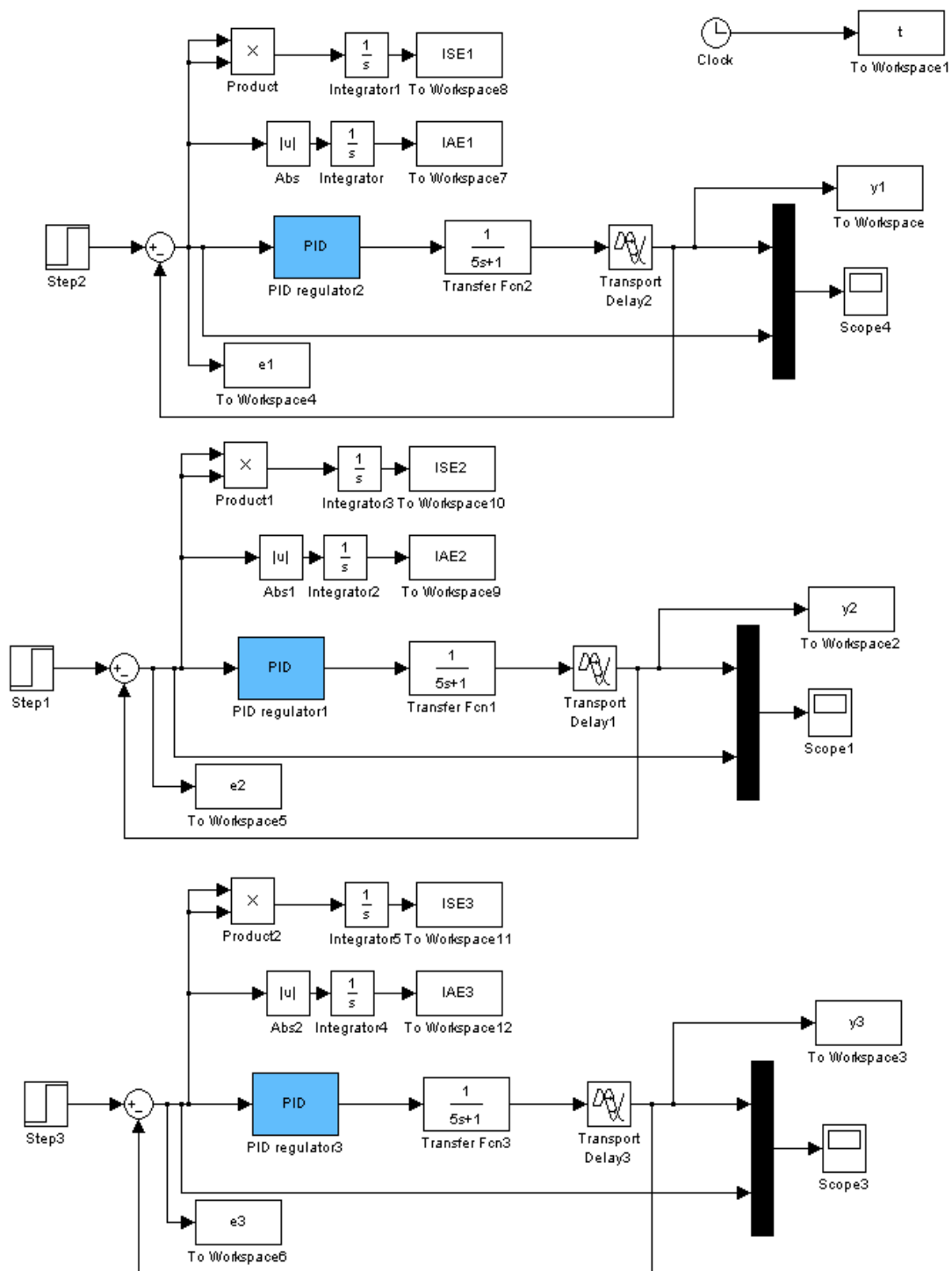
3.2. Experimentálne metódy

Experimentálne metódy skúmajú pre určenie parametrov regulátora priamo dynamické vlastnosti riadeného procesu.

Nastavenie PID regulátora:

$$G_R(s) = Z_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (33)$$

Z_R je zosilnenie regulátora, T_I integračná časová konštanta, T_D derivačná časová konštanta



obr. 11: Schéma riadenia systémov s dopravným oneskorením

Metódy založené na identifikácii 1. rádu s dopravným oneskorením

Identifikuje sa prenos v tvare:

$$G(s) = \frac{Z}{Ts + 1} e^{-Ds} = \frac{1}{5s + 1} e^{-2s} \quad (34)$$

Kde $Z=K$ =zosilnenie, $t_u=T_U=D$, $t_n=T_N=T$

Ziegler – Nicholsove metódy

Ziegler – Nicholsova metóda je jednou z najpoužívanejších a najviac rozšírených metód nastavovania PID regulátora.

Pri jej odvodení sa vychádzalo z riadeného systému opísaného prenosom jednoduchého integrátora s dopravným oneskorením a parametre regulátora boli vypočítané tak, aby výsledná riadená veličina pri úlohe regulácie vykazovala tlmené kmity s koeficientom tlmenia asi 25%.

PID regulátor:

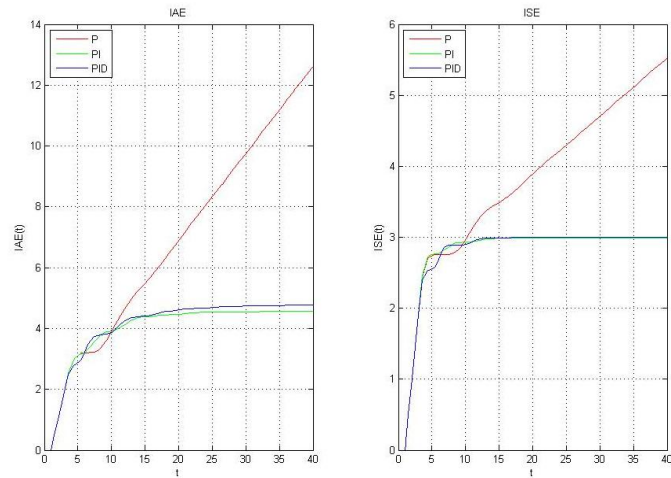
$$G_R(s) = Z_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (35)$$

Tab. 1: Tabuľka na výpočet parametrov regulátora ZNM

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

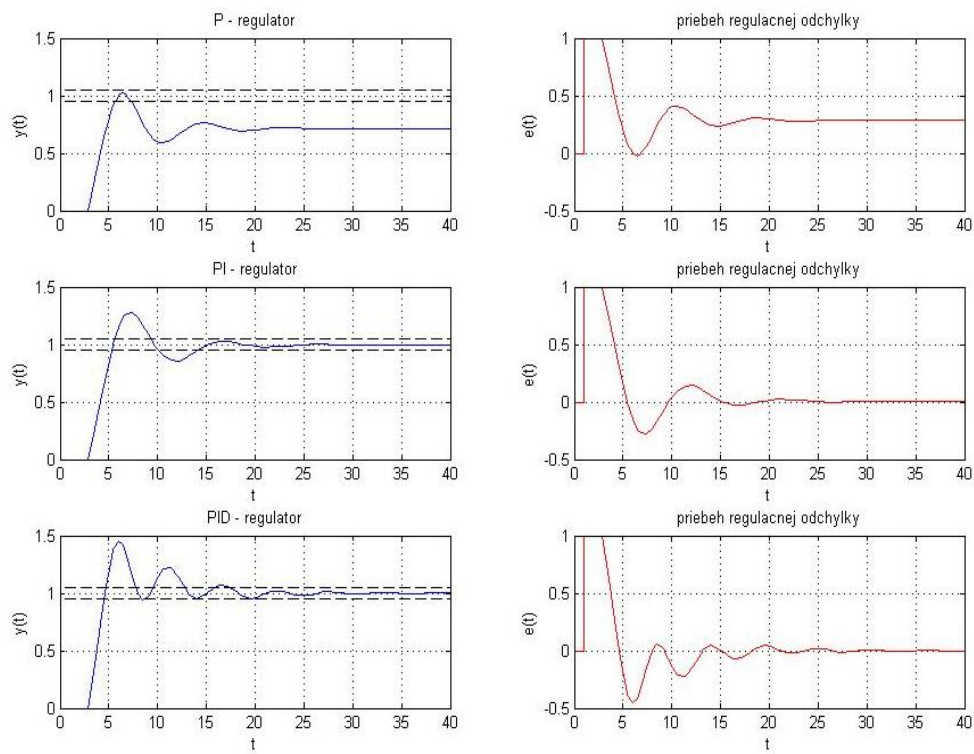
Tab. 2: Tabuľka hodnôt ukazovateľov riadenia kvality (ZNM)

Regulátor	t_{reg}	δ_{max}	IAE	ISE
P	7,3178	44,0356	12,6139	5,5235
PI	14,2274	27,7515	4,5622	2,9862
PID	17,4344	45,3863	4,7686	3,0009



obr. 12: Závislosti IAE a ISE od času pre P, PI, PID regulátory (ZNM)

Červená krivka znázorňuje IAE a ISE P regulátora, zelená zodpovedá PI a modrá PID regulátorom



obr. 13: Návrh regulačných obvodov, priebehy regulačných odchýliek (ZNM)

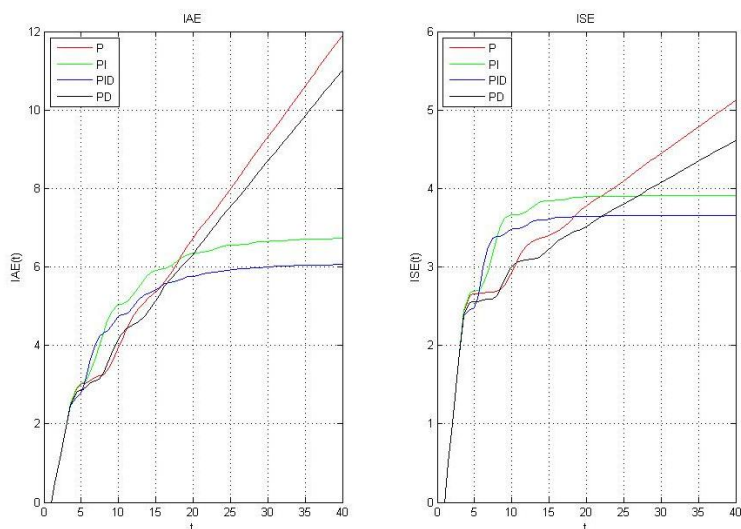
Cohen – Coonova metóda

Tab. 3: Tabuľka na výpočet parametrov regulátora CCM

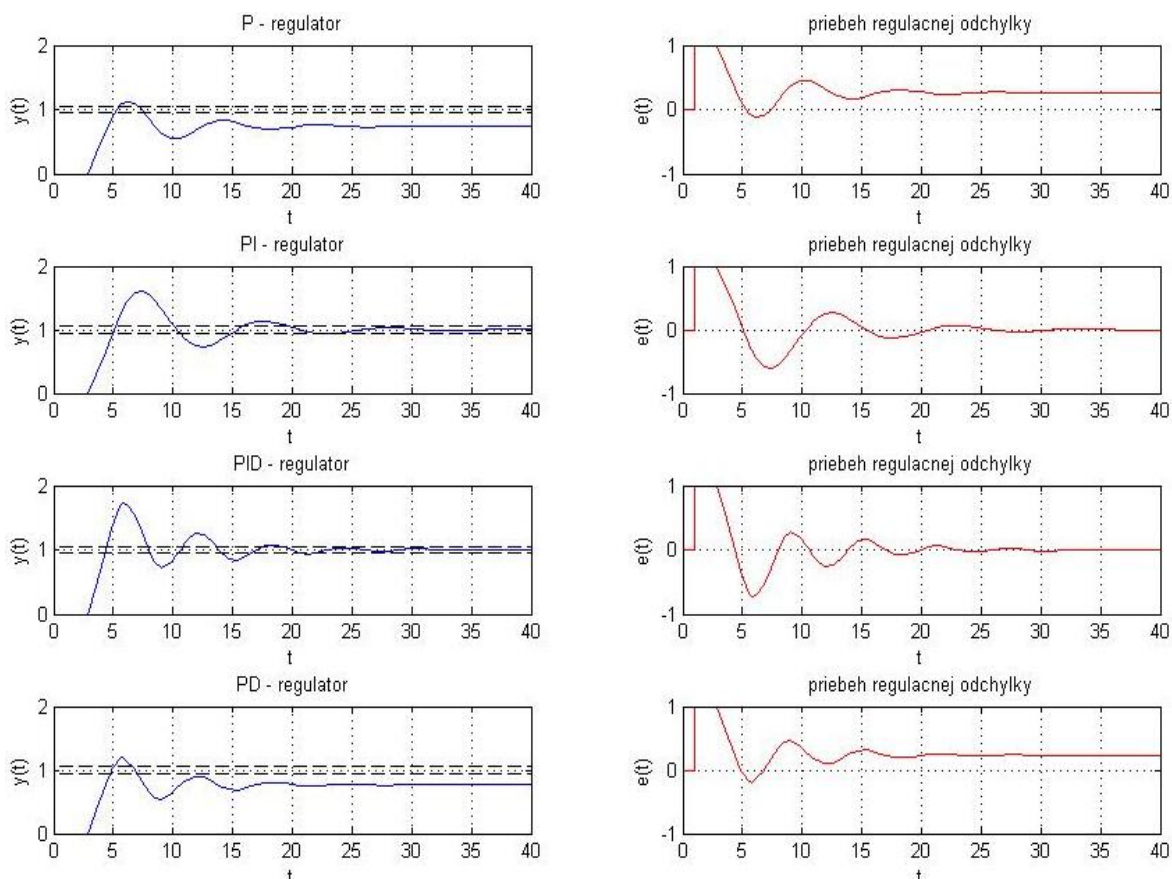
Regulátor	Z_R	T_I	T_D
P	$\frac{1}{Z} \frac{t_n}{t_u} \left(1 + \frac{1}{3} \frac{t_u}{t_n} \right)$		
PI	$\frac{1}{Z} \frac{t_n}{t_u} \left(0,9 + \frac{1}{12} \frac{t_u}{t_n} \right)$	$t_u \left(\frac{30 + 3 \frac{t_u}{t_n}}{9 + 20 \frac{t_u}{t_n}} \right)$	
PID	$\frac{1}{Z} \frac{t_n}{t_u} \left(\frac{4}{3}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

Tab. 4: Tabuľka hodnôt ukazovateľov riadenia kvality (CCM)

Regulátor	t_{reg}	δ_{max}	IAE	ISE
P	7,5656	52,7677	11,9126	5,1223
PI	23,8338	60,6358	6,7283	3,9066
PID	21,8440	73,5423	6,0603	3,6523
PD	6,9679	55,6690	11,0204	4,6168



obr. 14: Závislosti IAE a ISE od času pre P, PI, PID, PD regulátory (CCM)



obr. 15: Návrh regulačných obvodov, priebehy regulačných odchýlok (CCM)

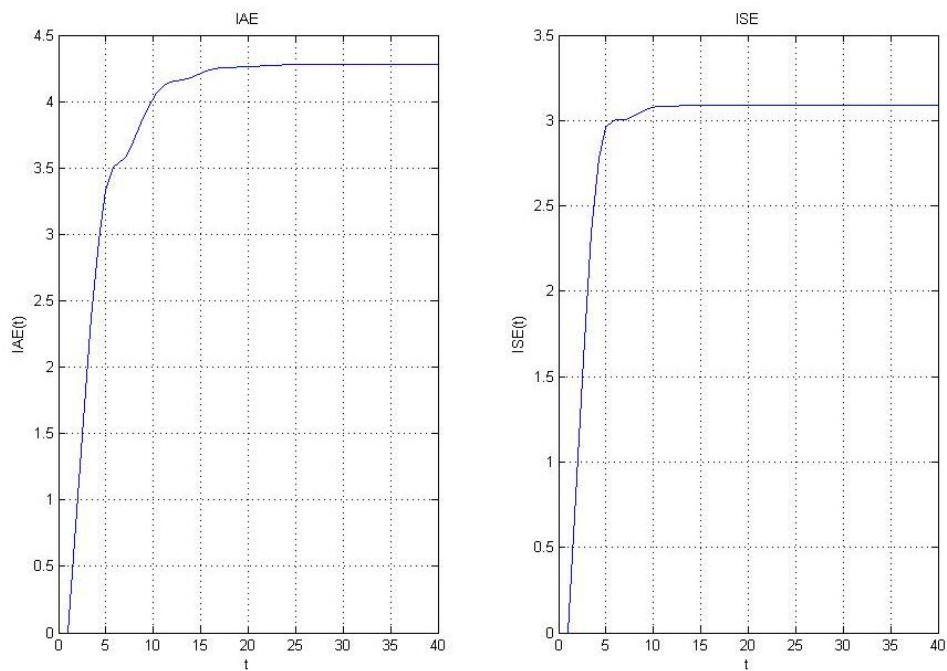
Haalmanova metóda

Tab. 5: Tabuľka na výpočet parametrov regulátora HM

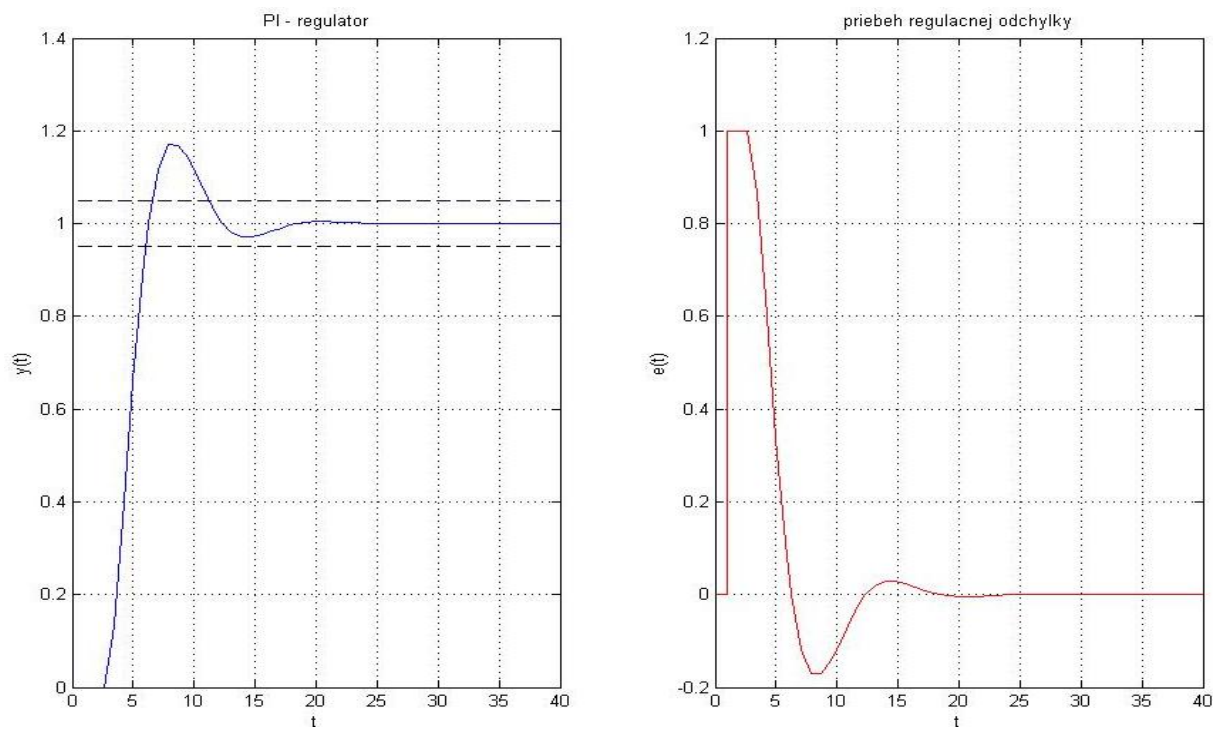
Regulátor	Z_R	T_I
PI	$\frac{2}{3} \frac{t}{Z t_u}$	t_n

Tab. 6: Tabuľka hodnôt ukazovateľov riadenia kvality (HM)

Regulátor	t_{reg}	δ_{max}	IAE	ISE
PI	11,2536	17,0477	4,2790	3,0882



obr. 16: Závislosti IAE a ISE od času pre PI regulátor (HM)



obr. 17: Návrh regulačného obvodu, priebeh regulačnej odchýlky (HM)

Chien – Hrones – Reswickova metóda

Riadenie na žiadanú hodnotu

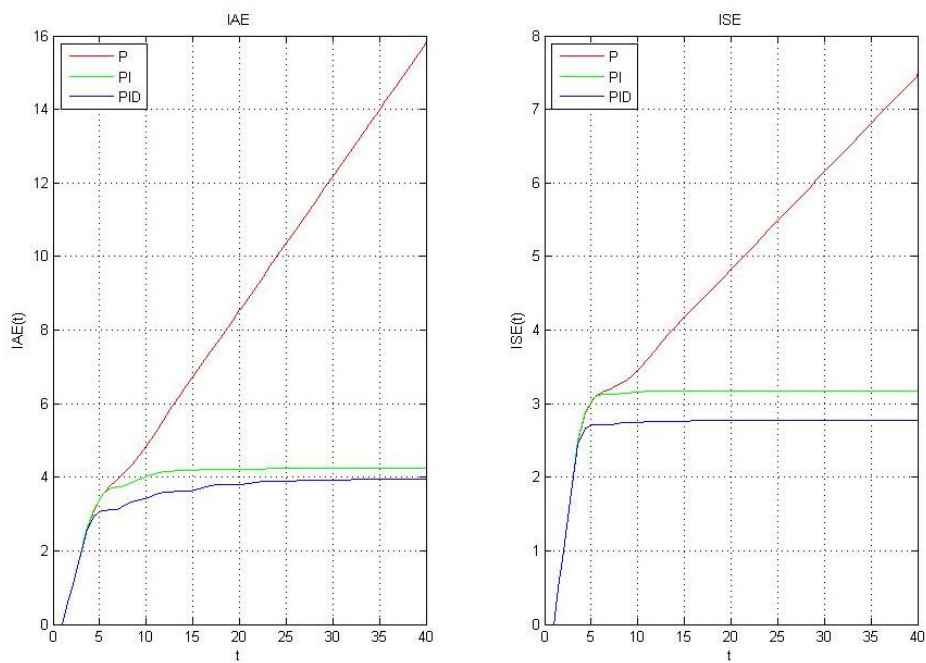
Povolené preregulovanie 20%

Tab. 7: Tabuľka na výpočet parametrov regulátora CHRM

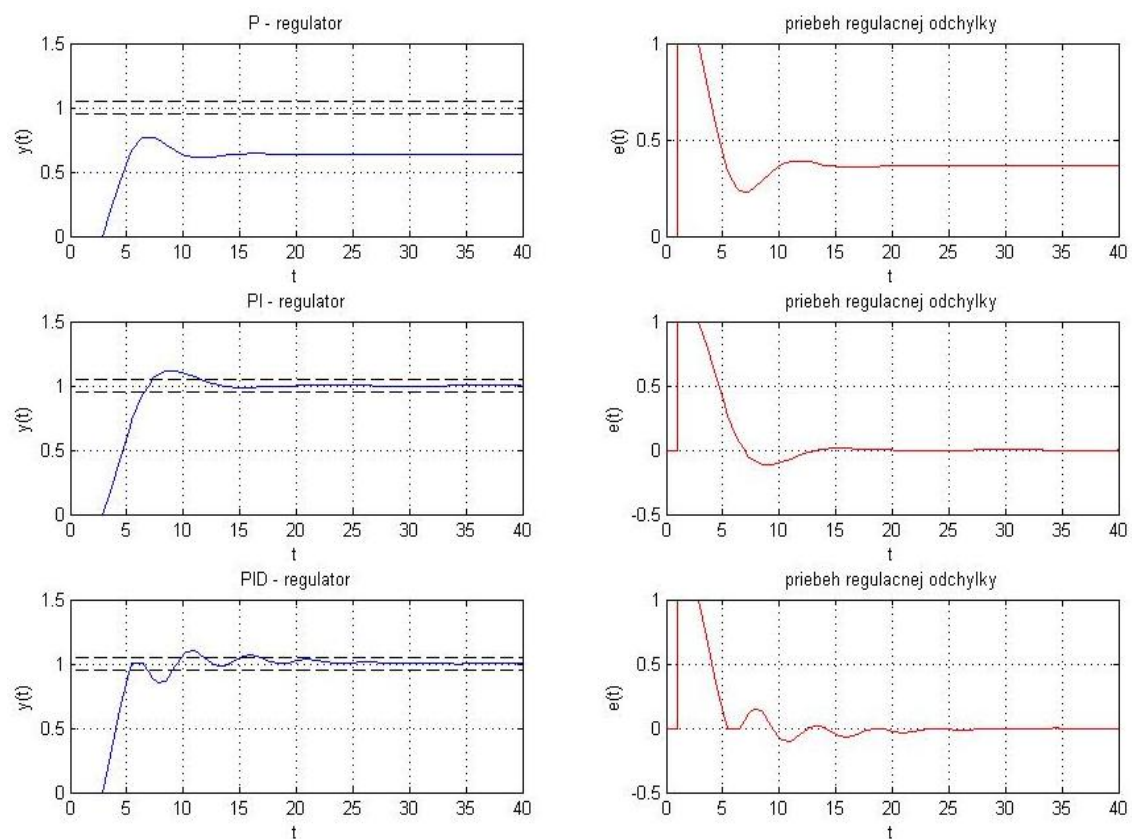
Regulátor	Z_R	T_I	T_D
P	$0,7 \frac{t_n}{Zt_u}$		
PI	$0,6 \frac{t_n}{Zt_u}$	t_n	
PID	$0,95 \frac{t_n}{Zt_u}$	$1,36t_n$	$0,64t_u$

Tab. 8: Tabuľka hodnôt ukazovateľov riadenia kvality (CHRM)

Regulátor	t_{reg}	δ_{max}	IAE	ISE
P	nevhodný	21,18	15,8086	7,4687
PI	11,9534	11,6126	4,2329	3,1679
PID	16,8513	9,8275	3,9455	2,7745



obr. 18: Závislosti IAE a ISE od času pre P, PI, PID regulátory (CHRM)



obr. 19: Návrh regulačných obvodov, priebehy regulačných odchýliek (CHRM)

Smith – Murrillova metóda

Mala by byť splnená podmienka: $0,1 < \frac{t_u}{t_n} < 1$

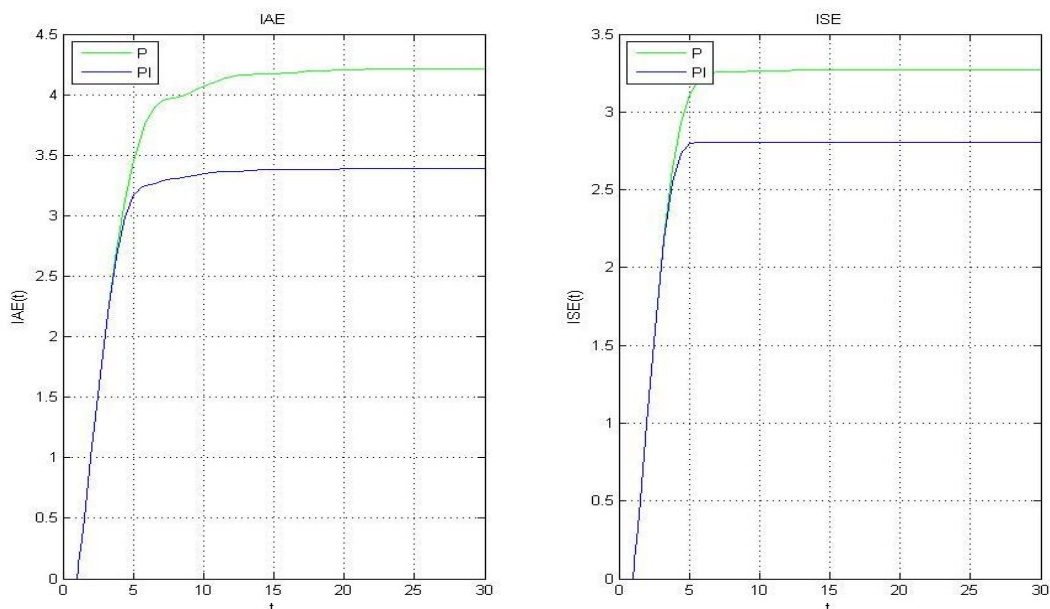
Riadenie na žiadanú hodnotu

Tab. 9: Tabuľka na výpočet parametrov regulátora SMM

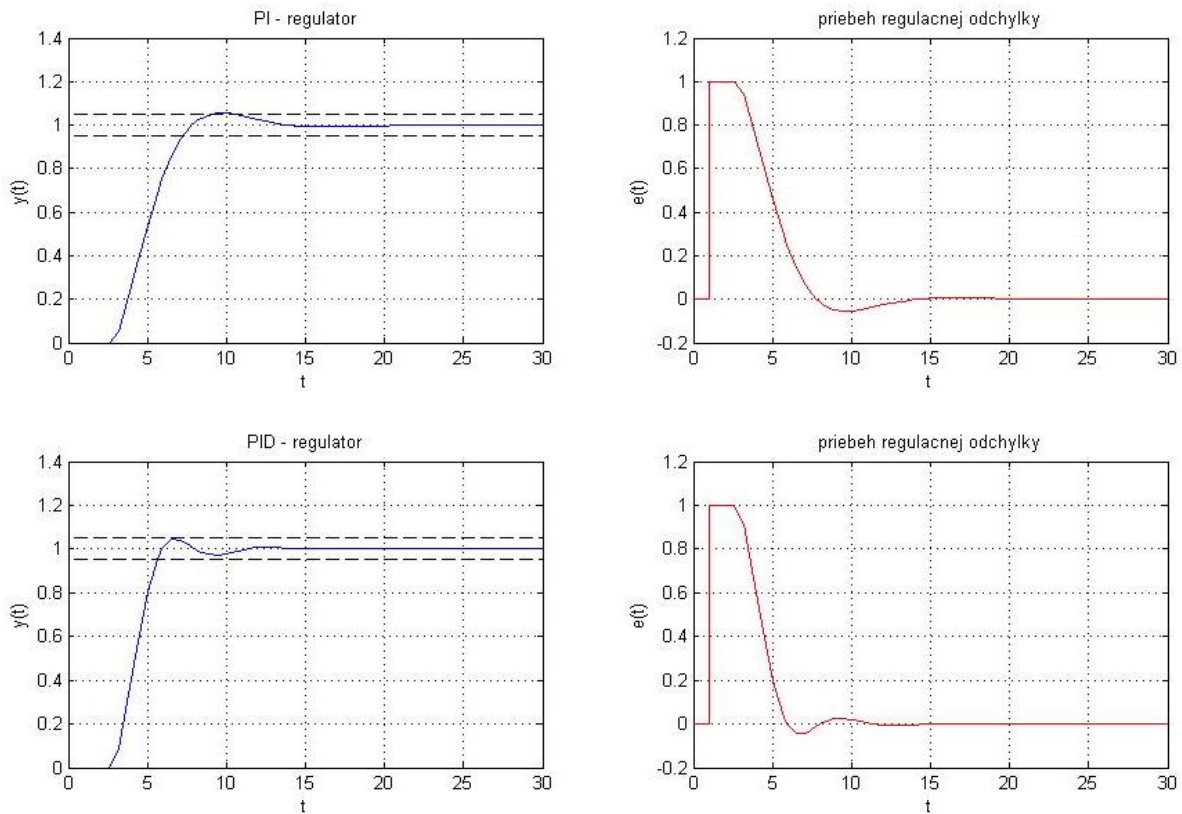
Regulátor	Z_R	T_I	T_D
PI	$\frac{0,586}{Z} \left(\frac{t_n}{t_u} \right)^{0,916}$	$\frac{t_n}{\left(1,03 - 0,165 \frac{t_u}{t_n} \right)}$	
PID	$\frac{0,965}{Z} \left(\frac{t_n}{t_u} \right)^{0,855}$	$\frac{t_n}{\left(0,796 - 0,147 \frac{t_u}{t_n} \right)}$	$0,308 t_n \left(\frac{t_u}{t_n} \right)^{0,929}$

Tab. 10: Tabuľka hodnôt ukazovateľov riadenia kvality (SMM)

Regulátor	t_{reg}	δ_{max}	IAE	ISE
PI	10,7143	5,4684	4,2136	3,2676
PID	5,6633	4,3870	3,3908	2,8074



obr. 20: Závislosti IAE a ISE od času pre P, PID regulátory (SMM)



obr. 21: Návrh regulačných obvodov, priebehy regulačných odchýliek (SMM)

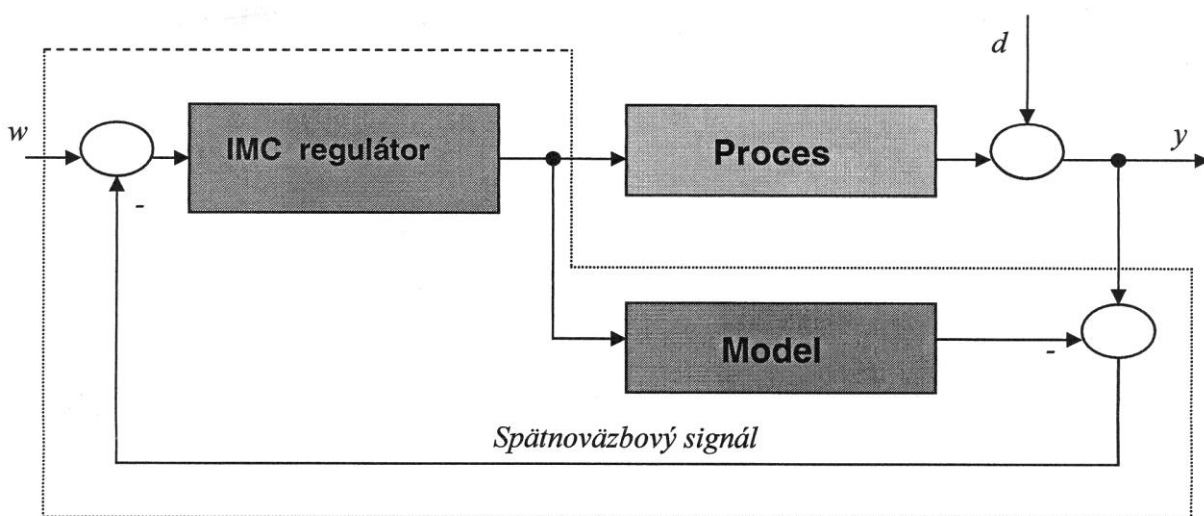
3.3. Riadenie s vnútorným modelom IMC

IMC regulátor hrá úlohu dopredného (feedforward) regulátora. IMC štruktúra nemá však nevýhody doprednej regulácie, pretože dokáže potláčať vplyv porúch spätnoväzbovým signálom.

Nepresnosť modelu spôsobuje, že v IMC štruktúre vzniká nutnosť brať do úvahy spätnoväzbovú stabilitu. Potrebne je teda rozladiť pôvodný dopredný IMC regulátor (s vysokým pásmom priepustnosti) za účelom dosiahnutia robustnosti.

Štruktúra IMC je navrhnutá pre kontrolu nestabilných procesov s dopravným oneskorením. Tieto systémy s dopravným oneskorením je zložité kontrolovať použitím rutinných kontrolných metód.

Simulácie ukazujú, že IMC metóda je nielen efektívna pre dynamiku a stabilitu systému manažérstva, ale je aj efektívna pre proces robustnosti. Okrem toho je jednoduchá na reguláciu a je aj vhodná pre inžinierske aplikácie.

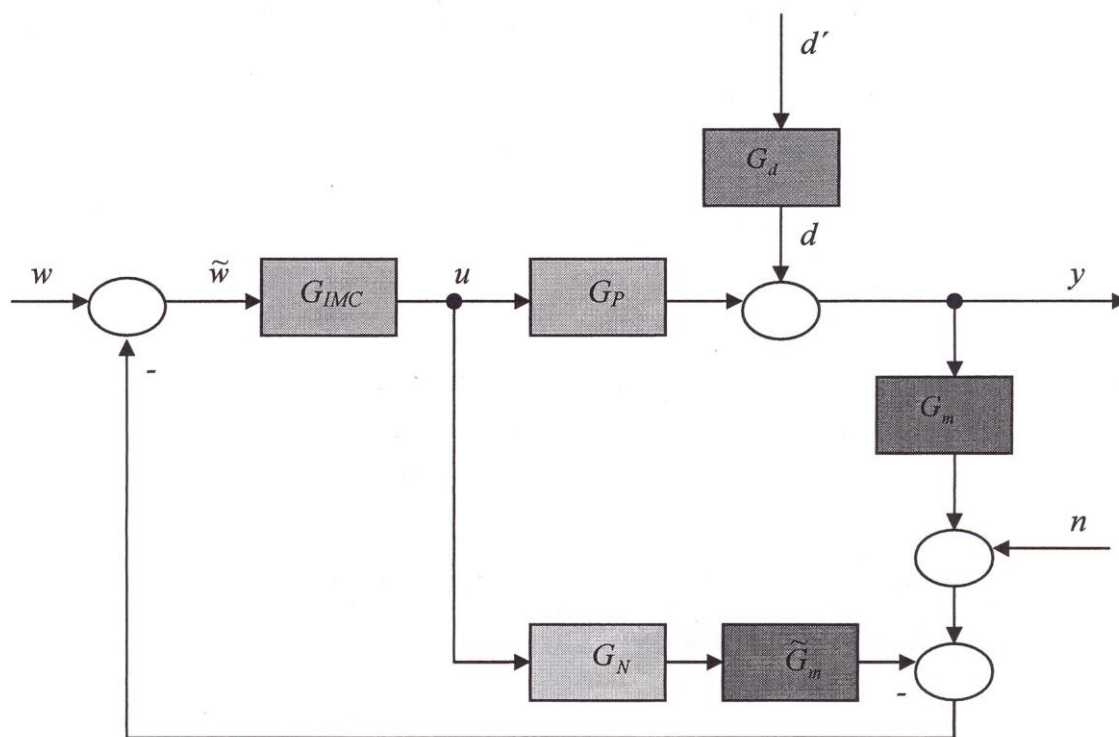


obr. 22: Štruktúra s vnútorným modelom

Prerušovanou čiarou je vyznačený riadiaci systém. Vstupmi do riadiaceho systému sú referenčný signál, meraný signál procesu a výstupom je akčný zásah vstupujúci do procesu.

Syntéza IMC regulátora prebieha v dvoch krokoch. V prvom kroku je regulátor navrhnutý ako optimálny pre sledovanie vstupu alebo potláčanie porúch, podľa niektorého kritéria optimality s ohľadom na uvažovaný model sústavy.

V druhom kroku môže byť IMC regulátor doplnený IMC filtrom (znižujúcim pásmo priepustnosti regulátora) tak, aby sa zabezpečilo dosiahnutia predpísaného stupňa robustnej stability a kvality pri známom rozsahu neurčitosti sústavy, resp. nepresnosti modelu.

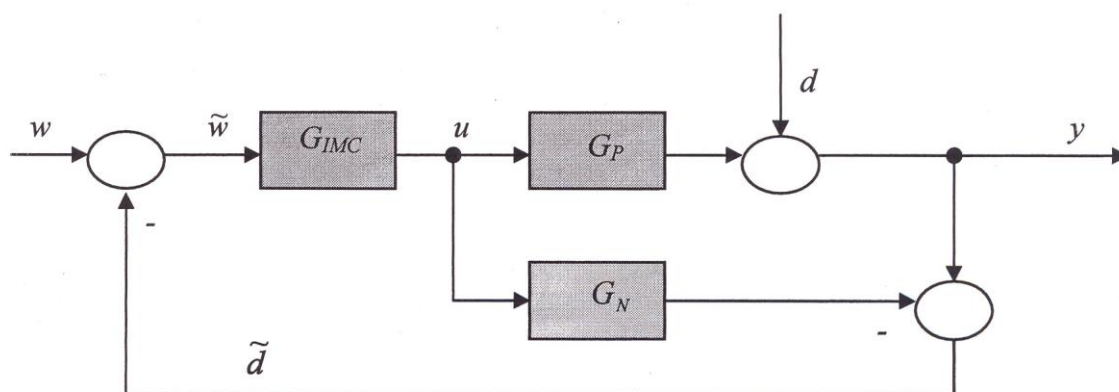


obr. 23: Všeobecný blokový diagram IMC štruktúry

Kde, G_P je prenosová funkcia procesu, G_m je prenosová funkcia meracieho zariadenia.

Ani G_P , ani G_m nie sú presne známe. Dostupné sú len ich odhady G_N a $\tilde{G}_m$.

Prenosová funkcia G_d opisuje vplyv poruchy d' na výstupnú veličinu procesu y . Meraný výstup je ovplyvňovaný šumom n . Prenosová funkcia regulátora je G_{IMC} a w je referenčný signál.



obr. 24: Zjednodušený blokový diagram IMC štruktúry

Spätnoväzbový signál je určený:

$$\bar{d} = (G_P - G_N)u + d \quad (36)$$

Ak je model presný ($G_N = G_P$) a na výstup nepôsobí žiadna neznáma porucha ($d=0$), potom výstup z modelu $\bar{y}$ a z procesu y sú zhodné a spätnoväzbový signál $\bar{d}$ (vyjadruje neurčitosť v systéme) je nulový.

Ak zlúčime bloky G_{IMC} a G_N do jedného bloku G_R , vznikne klasická štruktúra regulátora s prenosovou funkciou:

$$G_R = \frac{G_{IMC}}{1 - G_N G_{IMC}} \quad (37)$$

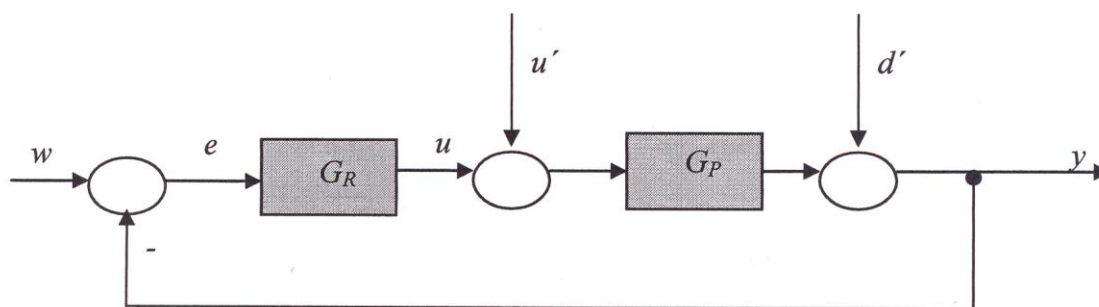
IMC regulátor určíme z klasického regulátora podľa vzťahu:

$$G_{IMC} = \frac{G_R}{1 - G_N G_R} \quad (38)$$

Vnútorná stabilita

Systém je vnútorne stabilný, ak na ohraničené signály vstupujúce do ľubovoľnej časti systému reaguje systém ohraničenou odozvou v ľubovoľnej inej časti systému.

Lineárny, časovo invariantný systém je vnútorne stabilný, ak prenosové funkcie medzi ľubovoľnými dvoma bodmi systému sú stabilné, t.j. majú všetky póly v otvorenej ľavej polrovine.



obr. 25: Blokový diagram pre diskusiu o vnútornej stabilite klasickej štruktúry

Zavedením pojmu vnútornej stability dostaneme úplnejšiu koncepciu vyšetrovania stability, než je obvyklá koncepcia založená len na vyšetrení koreňov charakteristickej rovnice $1+G_P G_R=0$ v tom zmysle, že vylučuje prípad presného krátenia nestabilných pólov a núl v súčine prenosových funkcií regulátora a procesu.

IMC štruktúra poskytuje nielen vhodnú parametrizáciu klasického regulátora, ale je výhodná aj v implementácii riadiaceho algoritmu. Použitie IMC implementácie je možné len vtedy, ak je zabezpečená vnútorná stabilita, to znamená, iba v prípade riadenia stabilného procesu.

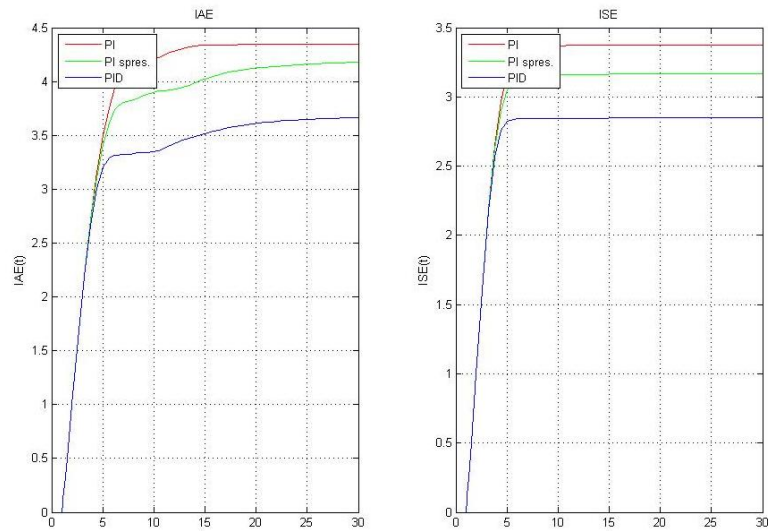
IMC forma a klasická spätnoväzbová forma predstavujú len rôzne spôsoby zápisu toho istého uzavretého regulačného obvodu. V prípade, keď do procesu nevstupujú neurčitosti, to znamená, že model presne vystihuje proces ($G_N=G_P$), a ak proces G_P je navyše stabilný, návrh IMC regulátora sa redukuje na návrh priamoväzbového optimálneho regulátora, navrhovaného podľa zvoleného kritéria optimality. Ak je proces G_P nestabilný, musí navyše regulátor stabilizovať proces [4].

Tab. 11: Tabuľka na výpočet parametrov regulátora s DO s IMC

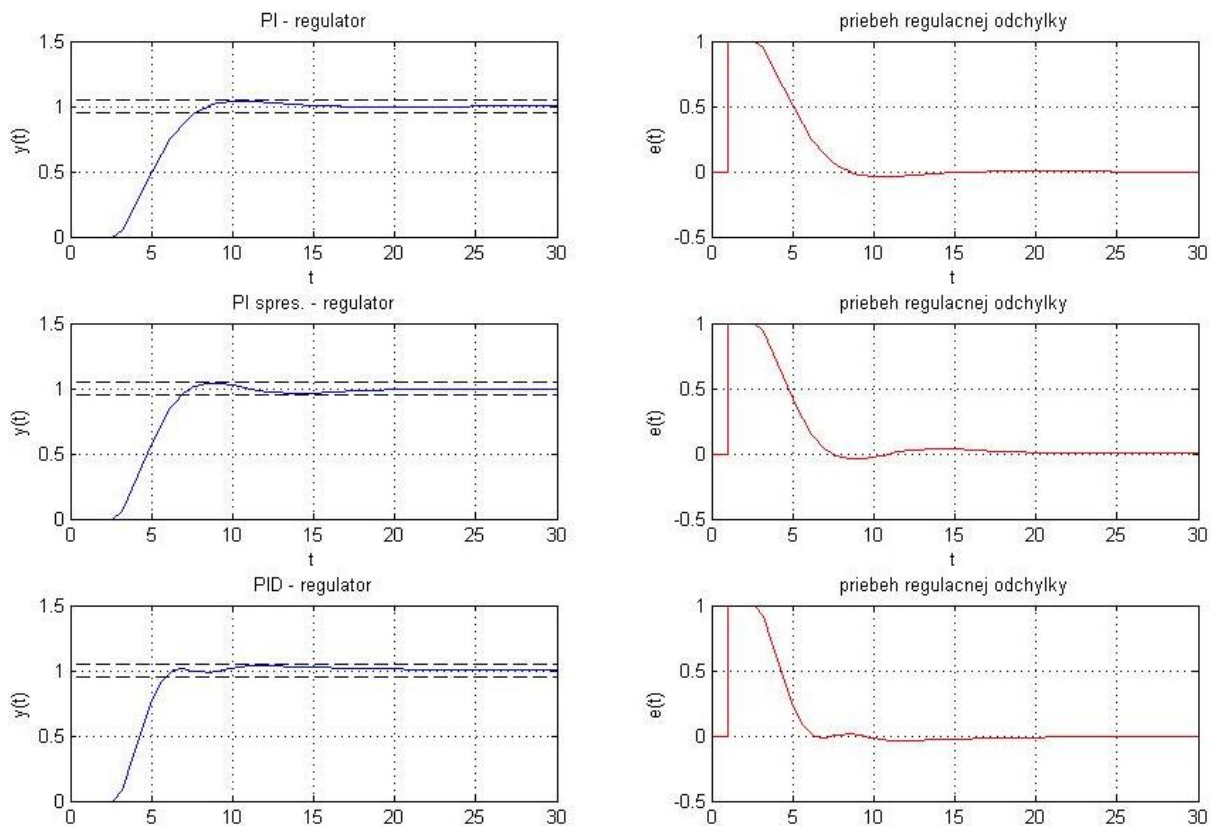
Regulátor	Z_R	T_I	T_D	Podmienka
PI	$\frac{T}{Z\lambda}$	T		$\lambda > 1,7D$
PI (spresnený)	$\frac{T + \frac{D}{2}}{Z\lambda}$	$T + \frac{D}{2}$		$\lambda > 1,7D$
PID	$\frac{T + \frac{D}{2}}{Z(\lambda + \frac{D}{2})}$	$T + \frac{D}{2}$	$\frac{TD}{2T + D}$	$\lambda > 0,8D$

Tab. 12: Tabuľka hodnôt ukazovateľov riadenia kvality s IMC

Regulátor	t_{reg}	δ_{max}	IAE	ISE
PI	7,6531	4,1537	4,3479	3,3735
PI(spresnený)	6,8878	4,4639	4,1784	3,1663
PID	5,8601	4,0304	3,6630	2,8487



obr.26: Závislosti IAE a ISE od času pre PI, PI(spres.), PID regulátory (IMC)



obr. 27: Návrh regulačných obvodov, priebehy regulačných odchýlok (IMC)

4. Záver

Mojou úlohou bolo skúmať kvalitu regulácie navrhnutých regulátorov podľa rôznych metód pre sústavu 1. rádu s DO. Používala som metódy experimentálne, ktoré skúmajú pre určenie parametrov regulátora priamo dynamické vlastnosti riadeného procesu, ďalej metódu IMC. Pomocou týchto metód som vyhodnocovala kvalitu riadenia na základe časových ukazovateľov riadenia kvality teda, čas regulácie, maximálne preregulovanie, a taktiež na základe integrálnych ukazovateľov riadenia kvality (IAE, ISE). Zvolila som si požadovanú regulačnú odchýlku 0,05, ktorá bola pre všetky metódy, resp. simulácie, rovnaká. Mojou úlohou bolo tiež navrhnúť regulátory vybranými metódami a ich simulačné overenie. Keďže môj prenos, ktorý nemal žiadnu poruchu, a ktorého DO malo malú hodnotu, boli pre návrh regulátorov pomerne vhodné všetky experimentálne metódy, ktoré som si vybrala, a to Ziegler–Nicholson, Cohen–Coon, Haalman, Chien–Hrones–Reswick, Smith–Murrill, a tiež metóda IMC. Porovnávala som aj jednotlivé aproximácie DO pri riadení systémov 1. a 2. rádu s DO vykreslením PCH. Ako najlepšia aproximácia pre riadenie systému s DO sa ukázala Pádeho aproximácia, kde PCH náhradného prenosu najlepšie kopíruje tvar našej danej PCH.

Z pohľadu zložitosti výpočtov parametrov regulátora je najjednoduchšia Haalmanova metóda. Podľa ZNM dával najlepšie výsledky PI regulátor, podľa CCM to bol PID regulátor, aj keď maximálne preregulovanie vykazoval PI regulátor lepšie, podľa CHRM by to bol PID regulátor, no čas regulácie bol u PI regulátora kratší, podľa SMM to bol PID regulátor, a taktiež to bolo u IMC. Najmenší čas regulácie sa ukázal u PID regulátora navrhnutého Smith–Murrillovou metódou, najmenšie maximálne preregulovanie mal PID regulátor navrhnutý metódou IMC, najlepšiu hodnotu IAE dával PID regulátor navrhnutý Smith–Murrillovou a najlepšiu hodnotu ISE mal PID regulátor navrhnutý Chien–Hrones–Reswickovou metódou.

Na základe týchto kritérií by som v praxi zvolila pre môj prenos návrh regulátora Smith–Murrillovu metódu, ktorá je síce zložitejšia na výpočet parametrov regulátora, ale dá sa povedať, že vykazovala najlepšie výsledky.

Zoznam použitej literatúry

[1] BAKOŠOVÁ, M.–FIKAR, M.–ČIRKA, Ľ.: Základy automatizácie: Laboratórne cvičenia zo základov automatizácie. STU v Bratislave, 2003. 153 s.
ISBN 80-227-1831-9

[2] BORKOVIČ, P.: Robustné riadenie sústavy s dopravným oneskorením:
<http://www.kirp.chof.stuba.sk/~borkovic/frprojekt.htm>, 20.5.2010

[3] KACHAŇÁK, A. – HOLIŠOVÁ, M.: Návrh fuzzy regulátora s kompenzáciou dopravného oneskorenia: http://www.atpjournal.sk/casopisy/atp_04/pdf/atp-2004-03-90.pdf, 20.5.2010

[4] Riadenie s vnútorným modelom (IMC):
<http://www.kasr.elf.stuba.sk/predmety/pmr/Studijna%20literatura%20k%20IMC/imc%20riadenie%20slov-uvod.pdf>, 20.5.2010

[5] SCHLEGEL, M.: Průmyslové PID regulátory: Tutorial,
http://www.rexcontrols.cz/downloads/clanky/PIDTutor_CZ.pdf, 20.5.2010