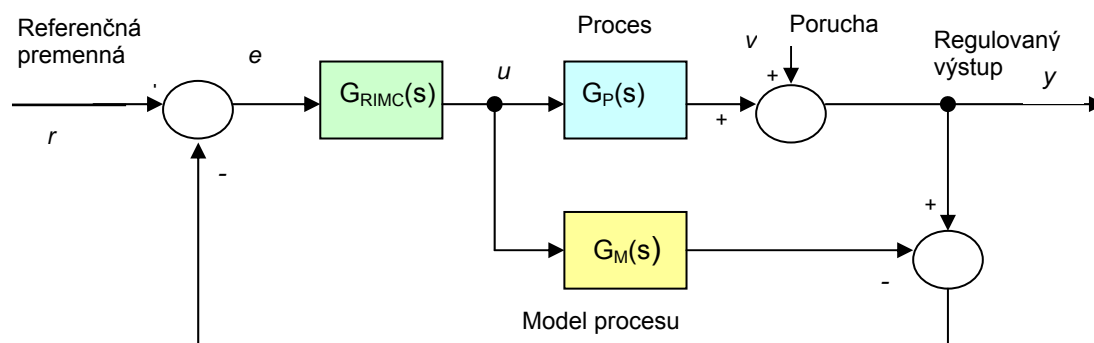


Moderné a praktické prístupy realizácie PID regulátorov (6)

Cieľom tejto časti príspevku je pokračovanie v opise a aplikácii moderných štruktúr a algoritmov riadenia, ktoré sú založené na metódach vnútorného modelu riadenia (IMC) resp. na metóde priamej syntézy (PS) riadenia s PID regulátormi. Obidva prístupy (PS) a (IMC) sú v podstate rovnaké s tým rozdielom, že u metód priamej syntézy sa jedná o výpočet koeficientov regulátora na základe žiadaného chovania uzavretého regulačného obvodu, (ktoré je reprezentované prenosovou funkciou resp. časovou konštantou) kým u metódy s vnútorným modelom sa využíva pri návrhu regulátora tzv. IMC filter, ktorý zaručuje navyše rovnakú kvalitu ako metóda (PS) a ešte aj robustnosť riadenia. Metóda vnútorného modelu je preto všeobecnejšia a to tým, že do zákona riadenia umožňuje zabudovať a zohľadniť nepresnosti a neurčitosti parametrov modelu, nemodelovanej dynamiky, neznámych nemeasurable porúch a aj časového oneskorenia.

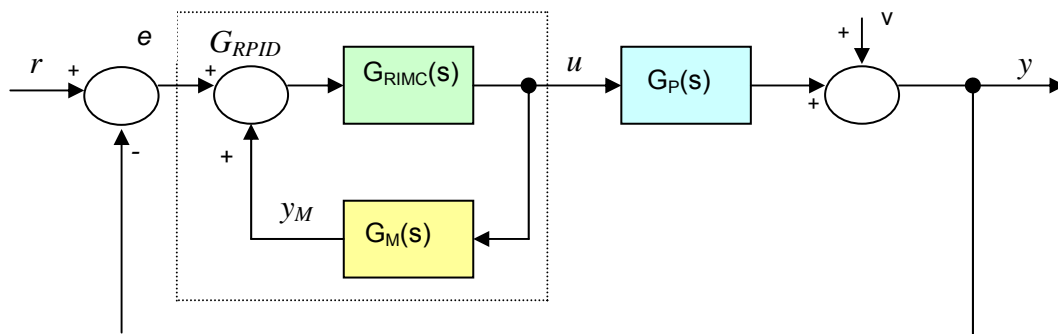
6.1 Metódy IMC pre praktické aplikácie

Základné princípy a štruktúry riadenia s vnútorným modelom boli už uvedené v 5. časti seriálu. Celkový postup riadenia s vnútorným modelom vychádza zo štruktúry obvodu riadenia znázornenej na obr. 6.1. Predpokladáme pritom, že matematický model riadeného procesu je reprezentovaný prenosovou funkciou nanajvyššieho tretieho rádu aj s dopravným oneskorením. Pretože IMC metodika je založená na výpočte koeficientov regulátora PID analytickou formou pre vyššie rády modelu procesu ako tri by odvodenie týchto koeficientov bolo zložité a aj nejednoznačné, preto sa snažíme modely vyšších rádoov redukovať na modely druhého, resp. prvého rádu (aj dopravným oneskorením).



Obr. 6.1 Štruktúra riadenia s IMC štruktúrou

Podľa obr. 6.1 vstupom do bloku IMC regulátora ($G_{RIMC}(s)$) je odchýlka medzi modelom procesu G_M a reálnym procesom G_P . Odchýlka nesie v sebe informáciu tak o vplyve nemeasurable poruchy ako aj o nemeasured dynamice a ďalších neurčitostiach, ktoré model nezohľadňuje. Na obr. 6.2 je zobrazená štruktúra pre spätný prepočet IMC regulátora na realizovateľnú PID formu.



Obr. 6.2 Vzájomná súvislosť IMC a PID regulátora

Syntéza riadenia s vnútorným modelom predstavuje dvojkrokový proces:

1. Výpočet štruktúry a parametrov IMC regulátora $G_{RIMC}(s) = \frac{G_{RPID}(s)}{1 + G_M(s)G_{RPID}(s)}$

Praktický v riešení namiesto G_{RIMC} uvažujeme rozšírenie aj s IMC filtrom, t.j.:

$$G_{RIMC}^F(s) = G_{RIMC}(s)G_F(s) = G_M^-(s)^{-1}G_F(s) = \frac{1}{G_M^-(s)} \frac{1}{(T_z + 1)^n} \quad (6.1)$$

- G_M^- predstavuje stabilnú časť prenosu (nie je v tom zahrnuté dopravné oneskorenie ani nestabilné korenie čitateľa prenosovej funkcie modelu procesu) a n je rád filtra, ktorý sa výberá tak aby regulátor bol realizovateľný (bližšie 5.časť seriálu))

2. Výpočet štruktúry a parametrov PID regulátora $G_{RPID}(s) = \frac{G_{RIMC}^F(s)}{1 - G_M(s)G_{RIMC}(s)}$

Pre praktické využitie metód IMC je potrebné G_{RIMC} formu transformovať na praktickú realizovateľnú formu.

IMC štruktúru riadenia môžeme aplikovať pre rôzne formy štruktúr PID regulátora. Uvedieme štyri základné praktické formy opisu PID regulátora prostredníctvom prenosových funkcií:

G_{RPID} :

- a. PID1: Ideálny opis $G_{RPID}(s) = P \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$
- b. PID2: Sériová forma $G_{RPID}(s) = P \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \left(\frac{T_d s + 1}{N T_d s + 1} \right), (N = 0.1, \dots, 0.5)$
- c. PID3: Paralelná forma $G_{RPID}(s) = P \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{N T_d s + 1} \right)$
- d. PID4: Ideálny PID s filtrom $G_{RPID}(s) = P \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \left(\frac{1}{T_f s + 1} \right)$

Metody IMC sú aplikovateľné pre rôzne typy procesov (stabilné, nestabilné, lineárne, nelineárne) a zvlášť sú vhodné pre procesy obsahujúce dopravné oneskorenie. Ako už bolo uvedené jednoduchosť metód IMC spočíva v analytickom odvodení vzťahov pre výpočet parametrov regulátorov. Odvodenie vzťahov pre výpočet parametrov PID regulátora môže byť pre procesy obsahujúce dopravné oneskorenia nejednoznačné z dôvodu možnosti rôznych spôsobov jeho aproximácie (viď. predchádzajúcu časť seriálu V.). Ak je regulovaný proces vyššieho rádu môžeme ho vždy aproximovať na model nižšieho rádu a to tak aby bolo možné aplikovať metodiku IMC syntézy. Matematický model druhého rádu je možné IMC metodiku použiť priamo alebo ho transformovať na systém prvého rádu (pre rôzne typy dynamiky II.rádu (na hranici stability, kmitavý tlmený a nekmitavý-tvrdo aperiodický) a použiť vzťahy ako pre výpočet parametrov pre I.rád (tab.6.1, tab.6.2).

Tab. 6.1 Aproximácia modelu II.rádu na I.rád

$G_{p_2}(s) = \frac{K_{p_2}e^{-D_2s}}{T_2^2s^2 + 2bT_2s + 1} \longrightarrow G_{p_1}(s) = \frac{K_{p_1}e^{-D_1s}}{T_1s + 1}$			
Parametre aproximácie	Proces na hranici stability	Nekmitavý-tvrdo aperiodický proces	Kmitavý-tlmený proces
Zosilnenie	$K_{p_1} = K_{p_2}$	$K_{p_1} = K_{p_2}$	$K_{p_1} = K_{p_2}$
Časová konštanta modelu I.rádu	$T_1 = 1.641T_2$	$T_1 = [0.828 + 0.812(T_{p_2}/T_{p_1}) + 0.172e^{-6:9T_{p_2}/T_{p_1}}]T_{p_1}$	$T_1 = 2bT_2$
Časové oneskorenie	$D_1 = 0.505T_2 + D_2$	$D_1 = \frac{1.116T_{p_2}T_{p_1}}{T_{p_1} + 1.208T_{p_2}} + D_2$	$D_1 = \frac{T_2}{2b} + D_2$

V praxi sa osvedčila náhrada dopravného oneskorenia Padeho rozvojom (prvý a druhý rad, rozvojom do Taylorovho radu, MacLaurinovým a pod.) Aplikáciou rôznych druhov a stupňov aproximácie dostaneme aj rôzne výsledky syntézy. V práci Rivera a kol.(1986) sú odvodené vzťahy pre syntézu PID regulátora IMC technikou na základe voľby požadovanej časovej konštanty chovania T_z (IMC filtra) uzavretého obvodu, v prácach Morari a Zafiriou (1989) je koeficient požadovaného chovania T_z uzavretého obvodu reprezentovaný a vyberaný ako funkcia dopravného oneskorenia a časovej konštanty (tab.6.2).

Tab. 6.2 Nastavovanie koeficientov IMC - PID a IMC – PI pre proces I.rádu

$G_{p_2}(s) = \frac{K_{p_2}e^{-D_2s}}{T_2^2s^2 + 2bT_2s + 1} \longrightarrow G_{p_1}(s) = \frac{K_{p_1}e^{-D_1s}}{T_1s + 1}$			
Typ regulátora	P	T_i	T_d
PI	$\frac{2T_1 + D_1}{2K_{p_1}T_z}$	$T_1 + 0.5D_1$	-
PID	$\frac{2T_1 + D_1}{2K_{p_1}(T_z + D_1)}$	$T_1 + 0.5D_1$	$\frac{T_1D_1}{2T_1 + D_1}$
IMC filter (pre PID1 a PID3)	$T_f = \frac{T_zD_1}{2(T_z + D_1)}$	-	-
Výpočet T_z (PID)	$T_z = \max(0.25D_1, 0.2T_1)$		

Pre procesy opísané prenosovou funkciou druhého rádu $G_{p_2}(s) = \frac{K_{p_2}e^{-D_2s}}{T_2^2s^2 + 2bT_2s + 1}$

$$P = \frac{2bT_2}{K_{p_2}(T_z + D_2)}, \quad T_i = 2bT_2, \quad T_d = \frac{T_2}{2b}$$

parametre PID regulátor nastavené IMC metódou sú v tvare (Fruehauf, Chien 1986)

Pre nekmitavý proces druhého rádu s rôznymi časovými konštantami T_{p_1} a T_{p_2}

$$G_{p_2}(s) = \frac{K_{p_2}e^{-D_2s}}{(T_{p_1}s + 1)(T_{p_2} + 1)}$$

koeficienty PID regulátora nastavené metódou IMC (Chien 1986) sú :

$$P = \frac{T_{p_1} + T_{p_2}}{K_{p_2}(T_z + D_2)}, \quad T_i = T_{p_1} + T_{p_2}, \quad T_d = \frac{T_{p_1}T_{p_2}}{T_{p_1} + T_{p_2}}, \quad T_z = \max(0.25D_2, 0.2T_2)$$

V ďalšej časti uvedie

me metodiku nastavovania koeficientov pri náhrade dopravného oneskorenia Mac Laurinovým rádom.

PID regulátor nastavovaný IMC metodikou podľa Morariho a Zafiriou a Lee a kol. (1989) využíva výpočet parametrov podľa vzťahu

$$G_{RIMC}^F(s) = G_M^-(s)^{-1} G_F(s) = \frac{1}{G_M^-(s)} \frac{1}{(T_z + 1)^n}$$

Stupeň n žiadaného polynómu sa vyberie tak tak, aby výsledný regulátor bol realizovateľný.

Ak rozvinieme vzťah pre IMC regulátor $G_{RIMC}^F(s) = \frac{f(s)}{s}$ do Mac Laurinovho radu

dostaneme $G_{RIMC}^F(s) = \frac{1}{s} \left(f(0) + f'(0)s + \frac{f''(0)}{2!} s^2 + \dots \right)$ a jeho porovnaním s rovnicou pre

PID regulátor získame nastavenia pre koeficienty regulátora

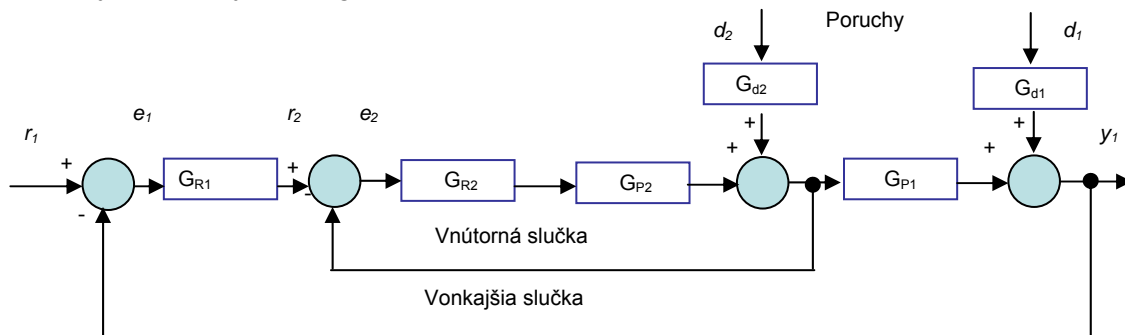
$$P = f'(0), T_i = \left(\frac{P}{f(0)} \right), T_d = \frac{f''(0)}{2P}$$

6.3 Tabuľka pre nastav.koef, PID regulátora IMC metodikou s využitím MacLaurinovho radu:

Typ modelu	P	T_i	T_d
1.rád s čas.on.	$\frac{T_i}{K_{p1}(T_z + D_1)}$	$T_i + \frac{D_1^2}{2(T_z + D_1)}$	$\frac{D_1^2}{2(T_z + D_1)} \left(1 - \frac{D_1}{3T_i} \right)$
2.rád kmitavý	$\frac{T_i}{K_{p2}(2T_z + D_2)}$	$2bT_2 - \frac{2T_z^2 - D_2^2}{2(2T_z + D_2)}$	$T_i - 2bT_2 + \frac{T_2^2 - \frac{D_2^3}{6(2T_z + D_2)}}{T_i}$
2.rád na hranici stability	$\frac{T_i}{K_{p2}(2T_z + D_2)}$	$2T_2 - \frac{2T_z^2 - D_2^2}{2(2T_z + D_2)}$	$T_i - 2T_2 + \frac{T_2^2 - \frac{D_2^3}{6(2T_z + D_2)}}{T_i}$
2.rád nekmit.	$\frac{T_i}{K_{p2}(2T_z + D_2)}$	$(T_{p1} + T_{p2}) - \frac{2T_z^2 - D_2^2}{2(2T_z + D_2)}$	$T_i - (T_{p1} + T_{p2}) + \frac{T_{p1}T_{p2} - \frac{D_2^3}{6(2T_z + D_2)}}{T_i}$
Výpočet T_z	$T_z = \max(0.25D_1, 0.2T_1)$		

6.2 IMC metódy riadenia pre kaskádne štruktúry riadenia

Výrazne zlepšenie kvality regulácie môžeme dosiahnuť aplikáciou metód IMC na kombinované zložité štruktúry riadenia, ktoré sa vyskytujú v praxi. Medzi takéto štruktúry patria kaskádne a dopredné regulačné štruktúry a ich kombinácie typické pre chemické procesy a procesy v energetike.



Pretože väčšina dynamických procesov v tepelnej energetike môže byť vyjadrená prostredníctvom prenosových funkcií prvého a druhého rádu s dopravným oneskorením nasledujúca tabuľka 6.3 výpočtu koeficientov IMC prístupmi je kombinovaná z rôznych rádo modelov procesu.

Tab.6.4 Nastavovanie koeficientov PID regulátor a IMC metodikou pre kaskádne štruktúry riadenia

Rád	Model procesu	IMC filter	P	T_i	T_d
I. VNS	$\frac{K_{p2}e^{-D_2s}}{T_2s + I}$	$\frac{e^{-D_2s}}{T_{z2}s + I}$	$\frac{T_i}{K_{p2}(T_{z2} + D_2)}$	$T_2 + \frac{D_2^2}{2(T_{z2} + D_2)}$	$\frac{D_2^2}{6(T_{z2} + D_2)}(3 - \frac{D_2}{T_i})$
II. VNS	$\frac{K_{p2}e^{-D_2s}}{T_2^2s^2 + 2b_2T_2s + I}$	$\frac{e^{-D_2s}}{T_{z2}s + I}$	$\frac{T_i}{K_{p2}(T_{z2} + D_2)}$	$2b_2T_2 + \frac{D_2^2}{2(T_{z2} + D_2)}$	$\frac{T_2^2 - \frac{D_2^2}{6(T_{z2} + D_2)}}{T_i} + \frac{D_2^2}{2(T_{z2} + D_2)}$
I. VOS	$\frac{K_{p1}e^{-D_1s}}{T_1s + I}$	$\frac{e^{-(D_1+D_2)s}}{T_{z1}s + I}$	$\frac{T_i}{K_{p1}(T_{z1} + D_1 + D_2)}$	$T_1 + T_{z2} + \frac{(D_1 + D_2)^2}{2(T_{z1} + D_1 + D_2)}$	$\frac{T_{z2}T_1 - \frac{(D_1 + D_2)^2}{6(T_{z1} + D_1 + D_2)}}{T_i} + \frac{(D_1 + D_2)^2}{2(T_{z1} + D_1 + D_2)}$
II. VOS	$\frac{K_{p1}e^{-D_1s}}{T_1^2s^2 + 2b_1T_1s + I}$	$\frac{e^{-(D_1+D_2)s}}{T_{z1}s + I}$	$\frac{T_i}{K_{p1}(T_{z1} + D_1 + D_2)}$	$2b_1T_1 + T_{z2} + \frac{(D_1 + D_2)^2}{2(T_{z1} + D_1 + D_2)}$	$\frac{(T_1^2 + 2b_1T_1T_{z1})/T_i - \frac{(D_1 + D_2)^2}{6(T_{z1} + D_1 + D_2)}}{T_i} + \frac{(D_1 + D_2)^2}{2(T_{z1} + D_1 + D_2)}$

V tabuľke 6.4 jednotlivé pojmy a označenia predstavujú: VNS –vnútorná slučka, VOS – vonkajšia slučka, T_{z1} - žiadaná dynamika chovania sa procesu prvého radu (koeficient IMC filtra), T_{z2} - žiadaná dynamika chovania sa procesu druhého rádu (koeficient IMC filtra)

Záver.

Šiesta časť seriálu mala za cieľ opis a vybraných postupov výpočtu parametrov PID regulátora IMC metodikou pre spätnoväzbové a kaskádne štruktúry riadenia. Príspevok predstavuje výber „najlepších“ metód IMC vhodných pre praktické aplikácie na základe odvodených výsledných nastavení koeficientov regulátorov uvedených v tabuľkách 6.1-6.4.

Podakovanie : Príspevok vznikol s podporou VEGA projektu č.1/1105/11.

Literatúra

- [1] Rivera,D.E.,Morari,M.& Skogestad.S, “IMC-PID controller design. Industrial Engineering and Chemical Process, Design and Development”, 25, 252 (1986).
- [2] Morari, M and E. Zafiriou (1989). Robust Process Control. Prentice-Hall, Englewood Cliff.
- [3] Rivera, D.E.; M. Morari and S. Skogestad (1986). 4: Internal model control: PID controller design. Industrial and Engineering Chemistry: Process Design and Development, 25, 252.
- [4] Fruehauf PS, Chien I-L, Lauritsen MD. Simplified IMC-PID tuning rules. ISA Transactions 1994;33:43–59.
- [5] Johnson, M.A. Moradi, M.H. “PID control: New Identification and Design Methods,” Springer, London, 2005

[6] Vítěčková, M: Jednoduché seřizení regulátorů metodou SIMC, AT&P journal PLUS2 2006

[7] Smith C, Corripio AB. Principles and practice of automatic process control. 3rd ed. New York: Wiley; 2006.

[8] Seshagirirao, A., V.S.R Rao, and M.Chidambaram, "Direct synthesis – based controller design for integrating processes with time delay," Journal of the Franklin Institute, 2008.

Pokračovanie v budúcom čísle