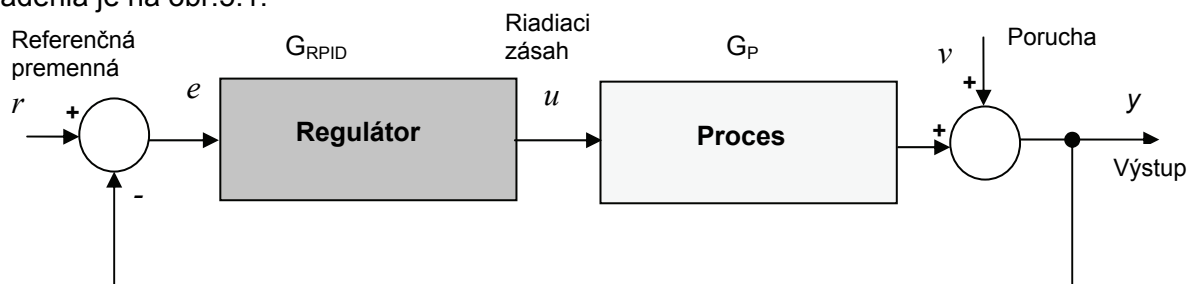


5. Moderné a praktické prístupy realizácie PID regulátorov (V. Časť)

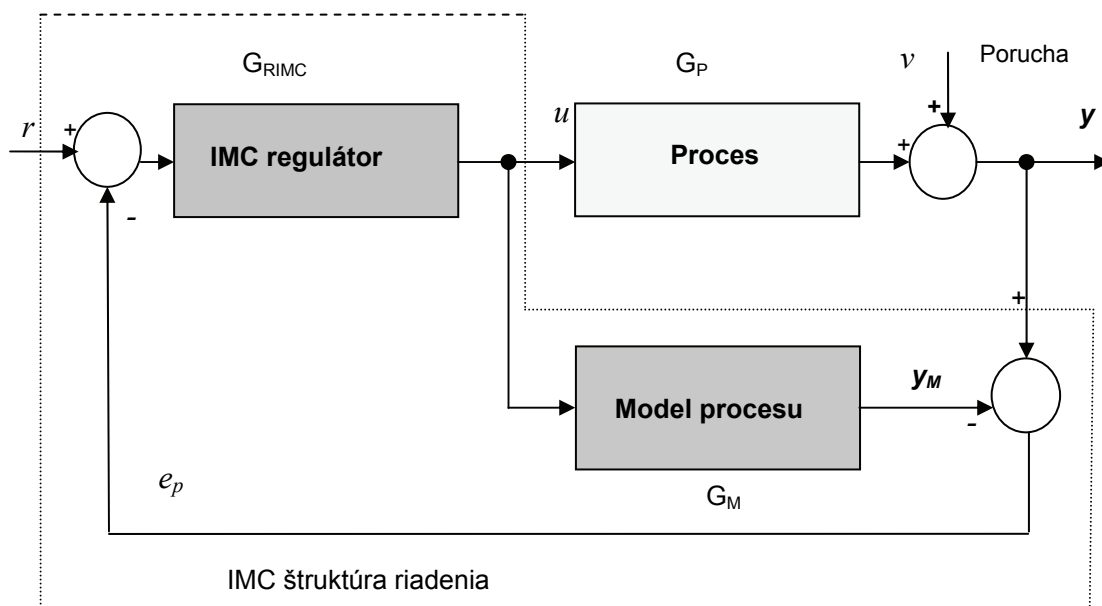
Cieľom tejto časti príspevku je opis moderných štruktúr a algoritmov riadenia, ktoré sú založené na princípe tzv. vnútorného modelu (IMC-Internal Model Control - Metódy riadenia s vnútorným modelom [1], [2]). Metódy IMC patria k skupine efektívnych a robustných metód riadenia, ktoré vychádzajú zo znalosti matematického modelu riadeného procesu. Umožňujú do zákona riadenia zabudovať a zohľadniť nepresnosti a neurčitosti parametrov procesov, nemodelovanej dynamiky, neznámych nemerateľných porúch a aj časového oneskorenia. Výsledkom syntézy je IMC regulátor, ktorý sa dá prepočítať na realizovateľnú priemernú formu PID regulátora.

5.1 Základné IMC štruktúry realizácie algoritmov riadenia

Metódy robustného riadenia s vnútorným modelom patria v súčasnosti medzi najviac využívané metódy v praktických aplikáciách. Sú vhodné práve vtedy, ak procesy riadenia sú značne zložité a neurčité vzhľadom na vplyv neurčitých parametrov (zloženie zmesi, zmeny koncentrácie vstupných surovín, kolísanie tlakových a prietokových pomerov a pod.) riadených procesov. Podobne ako pri štruktúre riadenia pre kompenzáciu dopravného oneskorenia so Smithovým prediktorom aj tu je k riadenému procesu paralelne pripojený model procesu. Základnou myšlienkou IMC štruktúry je korigovanie riadiaceho zásahu na základe odchýlky medzi výstupom z matematického modelu a výstupom z riadeného procesu. Ak predpokladáme, že model je ideálnou reprezentáciou procesu, potom spätnoväzbový signál je rovný len poruche. Za predpokladu zhody modelu a procesu je systém vlastne otvorený obvod, ktorý nemá klasickú spätnoväzbovú štruktúru a preto sa v ňom nevyskytuje problém spätnoväzbovej stability. Porovnanie základnej spätnoväzbovej a IMC štruktúry riadenia je na obr.5.1.



Konvenčná spätnoväzbová štruktúra



IMC štruktúra riadenia

Obr. 5.1 Konvenčná spätnoväzbová a IMC štruktúra riadenia

Na (obr. 5.1), je prerušovanou čiarou vyznačený celkový systém riadenia, ktorý zahŕňa dva bloky označené ako IMC regulátor a model. Vstupmi do riadiaceho systému sú referenčný signál a meraný signál výstupu procesu. Výstupom z bloku riadenia je riadiaci zásah vstupujúci do procesu. Výpočet optimálnych parametrov G_{IMC} a G_{RPID} regulátora vychádza zo znalosti matematických modelov model, ktoré sú vyjadrené prenosovými funkciami v s resp. z -oblasti získanými identifikačnými algoritmi a redukované na systémy prvého a druhého rádu. Celková syntéza s IMC štruktúrou predstavuje dvojetapový proces. V prvom etape sa vypočítajú parametre IMC regulátora a v druhom kroku sa štruktúra IMC regulátora a jej parametre prepočítajú na príslušnú realizovateľnú formu PID regulátora [6]. Metodika IMC je vhodná tak pre stabilné, ako aj nestabilné procesy s dopravným a bez dopravného oneskorenia a je rozšírená aj na fuzzy a fuzzy-neurónové IMC modely.

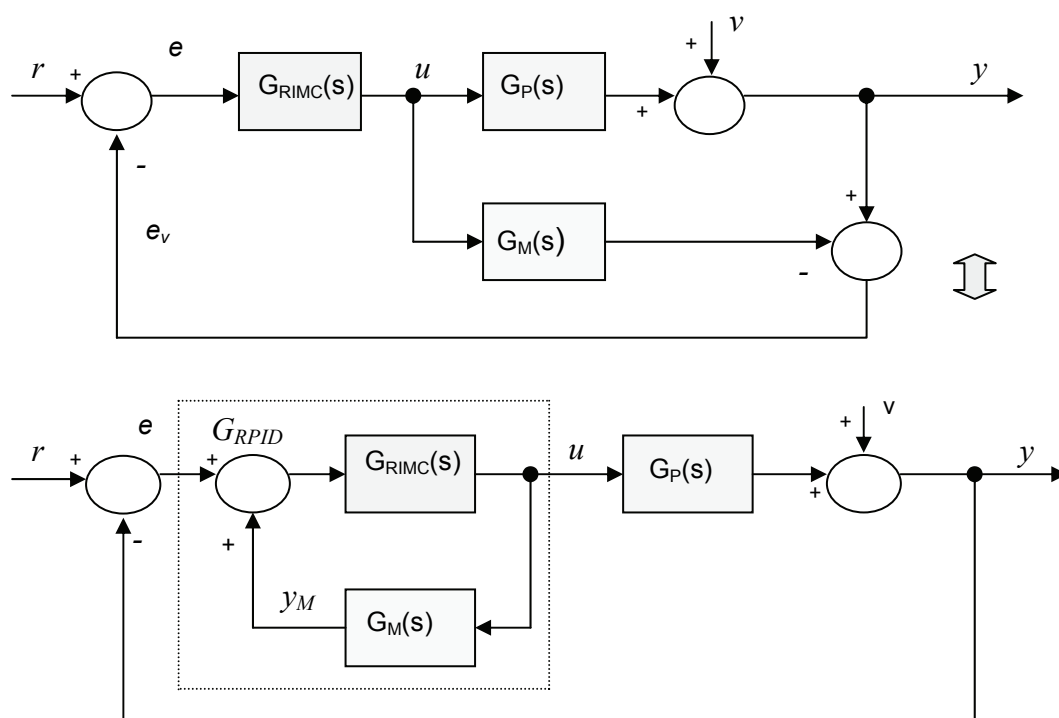
5.2 Vzťahy medzi IMC štruktúrou a klasickými spätnoväzbovými štruktúrami riadenia

Vzájomná súvislosť IMC štruktúry riadenia a klasického regulačného obvodu s regulátorom je zrejmá z obr. 5.1 a 5.2. Riadiaci zásah a výstup regulácie sú v oboch štruktúrach rovnaké. Ak zlúčime bloky G_{RIMC} (regulátor) a G_M (model procesu) do jedného bloku G_{RPID} , (obr. č. 5.2), vznikne klasická štruktúra regulátora s prenosovou funkciou:

$$G_{RPID}(s) = \frac{G_{RIMC}}{1 - G_M(s)G_{RIMC}(s)} = \frac{U(s)}{E(s)} \quad (5.1)$$

Z blokovej schémy na obr. 5.2 môžeme IMC regulátor určiť spätne z klasickej štruktúry na základe vzťahu:

$$G_{RIMC}(s) = \frac{G_{RPID}}{1 + G_M(s)G_{RPID}(s)} = \frac{U(s)}{E(s)} \quad (5.2)$$



Obr. 5.2 Vzájomná súvislosť IMC a PID regulátora

kde v je neznáma porucha, u je riadiaci zásah, ktorý vstupuje tak do modelu ako aj do procesu, y je výstup z procesu porovnávaný s výstupom z modelu y_M a ich rozdiel potom vstupuje do bloku regulátora

$$E_v(s) = (G_p(s) - G_M(s))U(s) + V(s) \quad (5.3)$$

- Ak porucha $V(s)$ je rovná nule potom veličina E_v je mierou rozdielu medzi procesom a modelom.

- Ak výstup z modelu je rovný výstupu z procesu, t.j. $G_p(s) = G_M(s)$ potom odchýlka $E_v(s) = V(s)$ Signál $E_v(s)$ predstavuje rozdiel medzi výstupom z modelu a reálneho procesu a zároveň predstavuje doplňujúcu a chýbajúcu informáciu (neurčitost'), ktorá nie je zohľadnená v modeli. Využívame ju na preto na korekciu riadiaceho zásahu. Korigovaný riadiaci zásah je potom vyjadrený vzťahom

$$U(s) = [R(s) - E_v(s)]G_{RIMC}(s) = \left[R(s) - (G_p(s) - G_M(s))U(s) - V(s) \right]G_{RIMC}(s) \quad (5.4)$$

Výstupná regulovaná veličina :

$$Y(s) = G_p(s)U(s) + V(s) = \frac{[R(s) - E_v(s)]G_{RIMC}(s)G_p(s)}{1 + [G_p(s) - G_M(s)]G_{RIMC}(s)} + V(s) \quad (5.5)$$

$$Y(s) = \frac{G_{RIMC}(s)G_p(s)R(s)[1 - G_{RIMC}(s)G_M(s)]V(s)}{1 + [G_p(s) - G_M(s)]G_{RIMC}(s)} \quad (5.6)$$

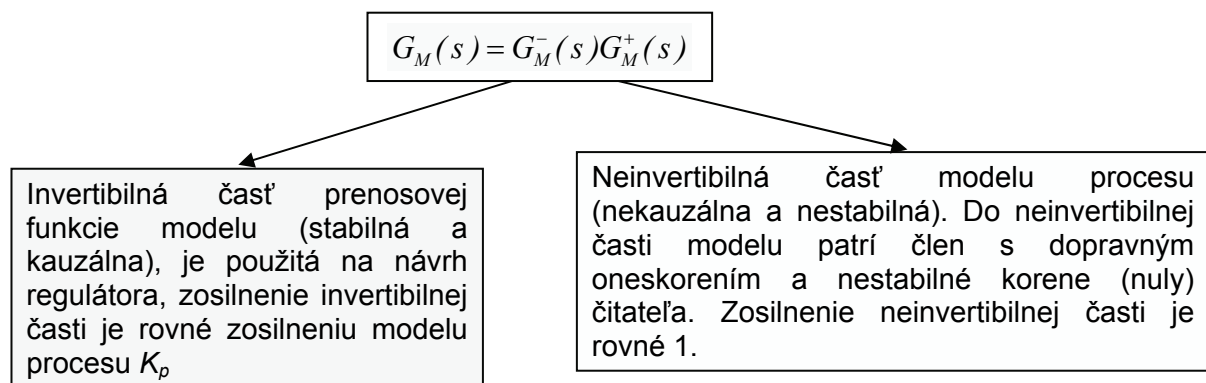
Zo vzťahu (5.6) je zrejme, že vplyv poruchy bude nulový ak $(1 - G_{RIMC}G_M) = 0$, teda $G_{RIMC}(s) = G_M^{-1}(s)$ a referenčná premenná bude dosiahnutá ak IMC regulátor bude inverziou matematického modelu riadeného procesu t.j. proces bude ekvivalentný s modelom:

$$1. G_{RIMC}(s) = G_M^{-1}(s) \quad (\text{regulátor je priamou inverziou modelu procesu}) \quad (5.7)$$

$$2. G_p(s) = G_M(s) \quad (5.8)$$

Ako je vidieť z predchádzajúcich úvah IMC forma a klasická spätnoväzbová forma predstavujú len rôzne spôsoby zápisu toho istého uzavretého regulačného obvodu. V prípade, ak proces neobsahuje neurčitosti a model presne vystihuje proces ($G_M(s) = G_p(s)$) a ak proces $G_p(s)$ je navyše stabilný, návrh IMC regulátora $G_{RIMC}(s)$ sa redukuje na návrh priamoväzbového regulátora, navrhovaného podľa určitého zvoleného kritéria optimality.

Ak model procesu obsahuje časové oneskorenie alebo nestabilné korene čitateľa, potom matematický model je potrebné vyjadriť (faktorizovať) ako súčin dvoch zložiek a to invertibilnej a neinvertibilnej, podľa nasledujúceho vzťahu:



Prínosom IMC štruktúry pre zvýšenie robustnosti riadenia a zaručenia stability uzavretého regulačného obvodu stability je predovšetkým v tom, že v prípade ak nevieme do modelu zabudovať a zohľadniť neurčitostí v procese riadenia (model nie je ekvivalentný s procesom, t.j. $G_M(s) \neq G_p(s)$), IMC štruktúra regulácie aj v takomto prípade umožňuje stabilizáciu procesu a to tak, že tak že k IMC regulátoru $G_{RIMC}(s)$ zaradíme člen s IMC filtrom s prenosovou funkciou $G_F(s)$:

$$G_{RIMC}^F(s) = G_{RIMC}(s)G_F(s) = G_M^-(s)^{-1}G_F(s) \quad (\text{regulátor sa určuje iba z invertibilnej časti}) \quad (5.9)$$

Takýto regulátor G_{RIMC}^F je schopný aj pre $G_M(s) \neq G_p(s)$ zabezpečiť stabilizáciu procesu a v čo najväčšej možnej miere zachovať kvalitu podľa zvoleného kritéria optimality. IMC filter

predstavuje z frekvenčného hľadiska spravidla dolnopriepustný filter, ktorý „zoslabuje“ účinky spätnej väzby v IMC štruktúre a referenčného signálu r na akčný zásah. Zaradenie filtra je teda na úkor zníženia kvality z hľadiska zvoleného kritéria optimality oproti použitiu pôvodného regulátora $G_{RIMC}(s)$ pre nominálny prípad $G_M(s) = G_p(s)$, pretože zaradenie dolnopriepustného filtra spôsobuje znižovanie pásma priepustnosti regulačného obvodu. Vzťah pre IMC regulátor rozšírený o sériové priradenie filtra k regulátoru:

$$G_{RPID}(s) = \frac{G_{RIMC}^F(s)}{1 - G_{RIMC}^F(s)G_M(s)} = \frac{G_M^-(s)^{-1}G_F(s)}{1 - G_M^-(s)^{-1}G_F(s)G_M^+(s)G_M^-(s)} = \frac{G_M^-(s)^{-1}G_F(s)}{1 - G_F(s)G_M^+(s)} = \frac{U(s)}{E(s)} \quad (5.10)$$

Príklady faktorizácie vybraných modelov:

$$1. G_p(s) = \frac{K_p}{1 + T_p s} = G_p^-(s)G_p^+(s)^- = \frac{K_p}{1 + T_p s} \cdot 1 \quad (5.11)$$

$$2. G_p(s) = \frac{K_p}{1 + T_p s} e^{-Ds} = G_p^-(s)G_p^+(s) = \underbrace{\frac{K_p}{1 + T_p s}}_{G^-} \underbrace{e^{-Ds}}_{G^+} \quad (5.12)$$

$$3. G_p(s) = \frac{-b_0 + b_1 s}{a_0 + a_1 s + a_2 s^2} e^{-Ds} = G_p^-(s)G_p^+(s)^- = \underbrace{\frac{1}{a_0 + a_1 s + a_2 s^2}}_{G^-} \cdot \underbrace{(-b_0 + b_1 s)e^{-Ds}}_{G^+} \quad (5.13)$$

Ak proces neobsahuje dopravné oneskorenie a ani nestabilné nuly v prenosovej funkcii modelu procesu, potom celkový algoritmus IMC regulátora je trojkrokový proces:

a1. Nájdenie prenosovej funkcie regulátora $G_{RIMC}^F(s)$ (aj s filtrom $G_F(s)$) tak aby prenosová funkcia IMC regulátora bola realizovateľná (t.j. aby mala rovnaký rad čitateľa a menovateľa nanajvyš čitateľ má o jeden rad vyšší stupeň čitateľa ako menovateľa) aj z dôvodu jednoznačnosti prepočítania IMC regulátora na príslušnú realizovateľnú formu PID.

a2. Prepočet IMC formy regulátora na príslušnú formu PID regulátora s priamym analytickým určením koeficientov regulátora, t.j. P , K_i a K_d

$$G_{RPID}(s) = P \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] = P \left(\frac{T_i T_d s^2 + T_i s + 1}{T_i s} \right) \quad (5.14)$$

a3. Realizácia simulácie uzavretého regulačného obvodu s navrhnutým PID regulátorom s uvažovaním úplnej ekvivalencie matematického modelu a procesu a pre nezgodu modelu procesu a reálneho procesu.

5.3 Prípadové štúdie-IMC štruktúry riadenia pre procesy bez dopravného oneskorenia

Odvodenie štruktúry IMC regulátora pre proces:

a. prvého radu $G_p(s) = \frac{K_p}{T_p s + 1}$

a1. Nájdenie prenosovej funkcie IMC regulátora s filtrom realizujeme tak aby výsledná štruktúra bola realizovateľná (rovnaký rad čitateľa a menovateľa)

$$G_{RIMC}^F(s) = G_{RIMC}(s)G_F(s) = G_M^-(s)^{-1}G_F(s) = \frac{T_p s + 1}{K_p} \frac{1}{T_F s + 1} = \frac{1}{K_p} \frac{T_p s + 1}{T_F s + 1} \quad (5.15)$$

a2. Nájdenie štandardného PI regulátora (zabezpečujúceho nulovú regulačnú odchýlku)

$$G_{RPID}(s) = \frac{G_{RIMC}^F(s)}{1 - G_{RIMC}^F(s)G_M(s)} = \frac{G_M^-(s)^{-1}G_F(s)}{1 - G_F(s)G_M^+(s)} = \frac{\frac{1}{K_p} \frac{T_p s + 1}{T_F s + 1}}{1 - \frac{K_p}{T_p s + 1} \frac{1}{K_p} \frac{T_p s + 1}{T_F s + 1}} = \frac{T_p s + 1}{K_p T_F s} \quad (5.16)$$

a3. Úprava G_{RPID} na štandardnú formu

$$G_{RPID}(s) = \frac{T_p s + 1}{K_p T_F s} = \left(\frac{T_p}{K_p T_F} \right) \frac{T_p s + 1}{T_p s} \Leftrightarrow P \frac{T_i s + 1}{T_i s} \quad (5.17)$$

(Koefficient filtra nepoznáme, volíme ho tak aby odozva výstupnej veličiny bola napr. väčšia ako časová konštanta procesu $T_F = T_p/2$)

Hľadaný regulátor prepočítaný z IMC štruktúry je typu PI :

$$u_i(t) = P(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt) = \frac{T_p}{K_p T_F} (e(t) + \frac{1}{T_p} \int edt)$$

b. Odvodenie IMC regulátora pre proces druhého radu bez dopravného oneskorenia

Uvažujme model druhého radu $G_p(s) = \frac{K_p}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$ (5.19)

b1. Nájdenie prenosovej funkcie IMC regulátora

$$G_{RIMC}^F(s) = G_{RIMC}(s)G_F(s) = G_M^-(s)^{-1}G_F(s) = \frac{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}{K_p} \frac{1}{T_F s + 1} \quad (5.20)$$

b2. Nájdenie PID regulátora z IMC štruktúry

$$G_{RPID}(s) = \frac{G_{RIMC}^F(s)}{1 - G_{RIMC}^F(s)G_M(s)} = \frac{\frac{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}{K_p} \frac{1}{T_F s + 1}}{1 - \frac{K_p}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \frac{1}{K_p} \frac{1}{T_F s + 1}} =$$

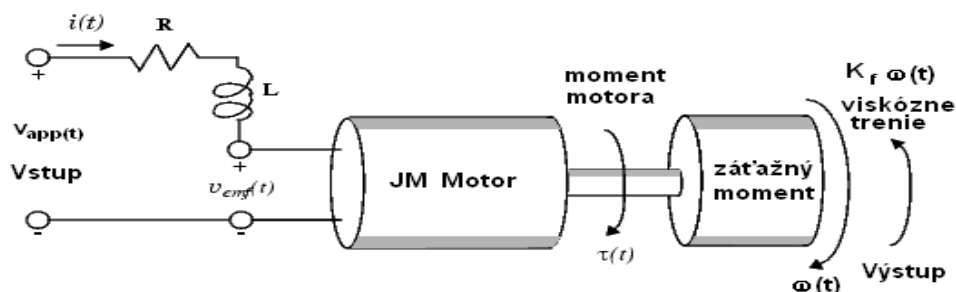
$$= \frac{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1}{K_p T_F s} \Leftrightarrow P \left(\frac{T_i T_d s^2 + T_i s + 1}{T_i s} \right) = \left(\frac{T_1 + T_2}{K_p T_F} \right) \frac{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1}{(T_1 + T_2)s} \quad (5.21)$$

b3. Úprava PID regulátora na štandardnú formu

$$u(t) = P \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de}{dt} \right) = \underbrace{\left(\frac{T_1 + T_2}{K_p T_F} \right)}_P \left(\underbrace{e(t) + \frac{1}{T_i} \int edt}_{T_i} + \underbrace{\left(\frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2} \right) \frac{de}{dt}}_{T_d} \right) \quad (5.22)$$

c. Aplikácia IMC metodiky pre návrh PID riadenia jednosmerného motora

Ukážeme v ďalšej časti postup výpočtu koeficienty PID regulátora riadenia uhlovej rýchlosti jednosmerného motora (obr.5.3) IMC metodikou uvedenou v predchádzajúcej časti.



Obr. 5.3 Bloková schéma jednosmerného motora

Model jednosmerného motora (uhlová rýchlosť/budenie):

$$G_M(s) = \frac{K_m}{LJ s^2 + (RJ + LK_f)s + (RK_f + K_m K_b)} = G_M^+(s)G_M^{-1}(s) = \frac{\Omega(s)}{V(s)} \quad (5.23)$$

c1. Nájdenie prenosovej funkcie IMC regulátora

$$G_{RIMC}^F(s) = G_{RIMC}(s)G_F(s) = G_M^-(s)^{-1}G_F(s) = \frac{LJs^2 + (RJ + LK_f)s + (RK_f + K_m K_b)}{K_m} \frac{I}{T_F s + I}$$

c2. Nájdenie PID regulátora z IMC štruktúry, úprava IMC regulátora na realizovateľnú PID formu:

$$G_{RPID}(s) = \frac{G_{RIMC}^F(s)}{I - G_{RIMC}^F(s)G_M(s)} = \frac{G_M^-(s)^{-1}G_F(s)}{I - G_F(s)(s)G_M^+(s)} = P \left[I + \frac{I}{T_i s} + T_d s \right] = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

Koeficienty PID regulátora pre reguláciu uhlovej rýchlosti prepočítané s IMC regulátora

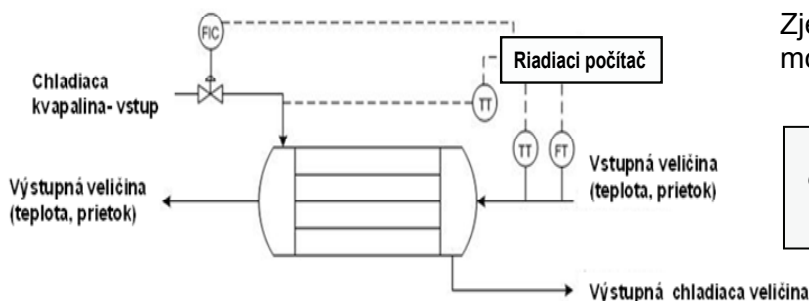
$$K_p = \frac{RJ + LK_f}{K_m T_F}, \quad K_i = \frac{RK_f + K_m K_b}{K_m T_F}, \quad K_d = \frac{LJ}{K_m T_F} \quad (5.24)$$

d. Aplikácia IMC metodiky pre riadenie procesov s dopravným oneskorením

V posledných desiatich rokoch bolo vypracovaných rad postupov návrhu robustných PID regulátorov (spätnoväzbové, priamoväzbové (s dvoma stupňami voľnosti) a kaskádne štruktúry regulácie) pre procesy, ktoré obsahujú dopravné oneskorenia. Matematické modely procesov s dopravným oneskorením sa vyskytujú predovšetkým v energetike (kotly, prehrievaky pary, reaktory, vykurovacie systémy a pod.). Takýto model získame zväčša experimentálnymi metódami identifikácie z prechodových charakteristík, resp. priamymi identifikačnými postupmi na základe ktorých získame autoregresné modely typu ARX, ARMAX, OE, IV a iné. Výhodou identifikácie z prechodových charakteristík je v tom, že na základe jednoduchých graficko – numerických výpočtov (jednobodovej resp. dvojbodovej identifikácie dokážu zohľadniť aj dopravné oneskorenia, kmitavý charakter procesu a aj poruchy, ktoré nedokážeme zmerať. Autoregresné modely sú diskrétného typu a pre potreby použitia metodiky IMC je vhodné ich transformovať do spojitej formy opisu. Nevýhodou týchto modelov je tá skutočnosť že sú spravidla vysokého radu a pre účely implementácie metodiky IMC prepočítané spojité formy opisov majú zväčša neminimálne fázový charakter (nestabilné nuly čitateľa prenosovej funkcie).

Pri redukcii matematických modelov vyšších radov na modely prvého a druhého radu získavame matematické modely, ktoré už budú obsahovať aj dopravne oneskorenie. Použitie metodiky IMC je potom realizované podľa postupov uvedených v predchádzajúcich častiach príspevku.

Pre ozrejmienie návrhu IMC regulátorov budú v ďalšej časti uvedené praktické postupy výberu radu filtra n a jeho časovej konštanty T_F .



Zjednodušený matematický model vymenníka tepla:

$$G_p(s) = \frac{K_p}{(T_p s + I)^3} e^{-D_s} \approx \frac{K_p e^{-D_s}}{T_p s + I} = \frac{Y(s)}{U(s)}$$

Obr.5.4 Principiálna schéma vymenníka tepla

Matematický model výmenníka tepla (vstupno/výstupný opis) je reálne opísaný parciálnymi rovnicami, ktoré sa pre účely riadenia aproximujú lineárnymi diferenciálnymi rovnicami alebo prenosovou funkciou tretieho a vyšších radov. Pre účely riadenia sa používa tretí rad alebo

jeho najjednoduchšia forma prvý rad s dopravným oneskorením.

Uvažujme matematický model výmenníka tepla s prenosovou funkciou vyjadrenou v redukovanej forme v tvare:

$$G_M(s) = \frac{K_p}{(T_p s + 1)^3} e^{-Ds} \approx \frac{K_p e^{-D_1 s}}{T_{p1} s + 1} = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (5.25)$$

Faktorizácia procesu na invertibilnú a neinvertibilnú časť:

$$d1. G_M^-(s) = \frac{K_p}{(1 + T_p s)^3}, \quad G_M^+(s) = e^{-Ds}$$

Neinvertibilná časť pre praktické účely sa aproximuje Padeho rozvojom, najčastejšie je to prvým radom:

$$G_p^+(s) = e^{-Ds} \approx \frac{-0.5Ds + 1}{0.5Ds + 1} \quad (5.26)$$

Iná aproximácia neinvertibilnej časti je realizovaná rozvojom do Taylorovho radu (1. člen)

$$G_p^+(s) = e^{-Ds} \approx 1 - Ds + \dots \quad (5.27)$$

Ak uvažujeme redukovaný model výmenníka tepla 1. radu s dopravným oneskorením, potom faktorizácia modelu je vyjadrená

$$G_M(s) = \frac{K_p}{1 + T_p s} e^{-Ds} = \frac{K_p (-0.5Ds + 1)}{(1 + T_p s)(0.5Ds + 1)} = \underbrace{\frac{K_p}{(1 + T_p s)(0.5Ds + 1)}}_{G_M^-} \underbrace{(-0.5Ds + 1)}_{G_M^+}$$

$$d2. G_{RIMC}^F(s) = G_{RIMC}(s)G_F(s) = G_M^-(s)^{-1}G_F(s) = \frac{(1 + T_p s)(0.5Ds + 1)}{K_p} \frac{1}{(1 + T_F s)^n} \quad (5.28)$$

Realizovateľný PID regulátor pre rad filtra $n=1$ spolu s určením jeho koeficientov je potom vyjadrený :

$$G_{RPID}(s) = \frac{G_{RIMC}^F(s)}{1 - G_{RIMC}^F(s)G_M(s)} = \frac{G_M^-(s)^{-1}G_F(s)}{1 - G_F(s)(s)G_M^+(s)} = \left(\frac{1}{K_p}\right) \frac{(1 + T_p s)(0.5Ds + 1)}{(T_F + 0.5D)s} =$$

$$d3. \left(\frac{1}{K_p}\right) \frac{0.5T_p D s^2 + (T_p s + 0.5D)s + 1}{(T_F + 0.5D)s} = P \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

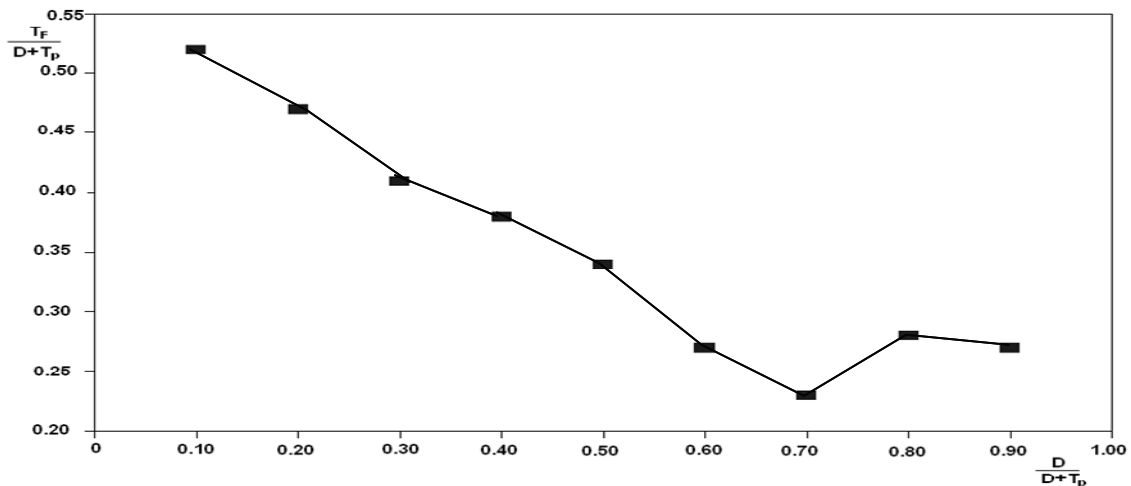
$$K_p = \frac{(T_p + 0.5D)}{K_p(T_F + 0.5D)}, \quad T_i = T_p + 0.5D, \quad T_d = \frac{T_p D}{2T_p + D} \quad (5.29)$$

Výber radu IMC filtra n sa realizuje tak, aby regulátor bol „realizovateľný“. Pre výber parametrov filtra existuje rád numerických a graficko-numerických postupov. Z praktického hľadiska koeficient filtra T_F sa vyberá tak na základe známych hodnôt časovej konštanty procesu a to tak aby odozva uzavretého obvodu bola dvakrát rýchlejšia ako odozva v otvorenom obvode t.j. $T_F = T_p / 2$. Existujú aj iné metódy výpočtu časovej konštanty filtra, ktoré sa dajú určiť na základe známej hodnoty dopravného oneskorenia výstupnej veličiny procesu D a časovej konštanty procesu T_p (Rivera et al., 1986, Chien and Fruehauf, 1990, (Skogestad, 2003). Iný praktický graficko-analytický spôsob určenia IMC filtra je na obr.5.6.

$$1. (T_F / D) > 0.8 \quad a \quad T_F > 0.1T_p$$

$$2. T_p > T_F > D$$

$$3. T_F = D$$



Obr. 5.6 Graficko-numerický postup výpočtu časovej konštanty filtra T_f

Určenia časovej konštanty filtra sa dá efektívne realizovať podľa obr.5.6. Na základe známej hodnoty dopravného oneskorenia D a časovej konštanty procesu T_p určíme pomer $D/(D+T_p)$, ktorý vynesieme na vodorovnú os do grafu a na zvislej osi určíme odpovedajúcu hodnotu pomeru $T_f/(D+T_p)$ z ktorého vypočítame neznámu hodnotu T_f .

Záver.

Táto časť seriálu mala za cieľ opis a charakteristiku základných štruktúr a robustných metód PID riadenia procesov nazývaných *Metódy vnútorného modelu* (IMC). Príspevok predstavuje úvod do problematiky metód IMC. V nasledujúcom príspevku budú prezentované aplikácie uvedenej metodiky pre riadenie stabilných, nestabilných procesov, integračných a procesov s časovými oneskoreniami.

Poďakovanie : 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] Vítečková, 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] Seshagirao, 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