

Układy regulacji z modelem obiektu *model-reference control system (MRCS)*

Idea:

- regulatory oparte na modelu
 - układy zawierające model w strukturze układu regulacji
- Różne konfiguracje układu regulacji z modelem:
- IMC (Internal Model Control) - sterowanie z modelem wewnętrznym. 1 regulator, 1 model
 - MBC (Model Based Control) – 1 regulator, 1 model (to samo co MRAC?)
 - MRAC - Model-reference adaptive control system (MRAC), nie są to r.adaptacyjne bo mają stały model i nastawy
 - PMBC - Process-model based control - zawiera nieliniowy model procesu
 - MFC (Model Following Control) – 2 regulatory, 1 model
 - MFCD (Model Following Control with time Delay)

- Regulacja w układach z opóźnieniem

- Regulatory IMC (Internal Model Control)

- Regulatory MBC (Model Based Control)

- Regulatory MFC (Model-Following Control)

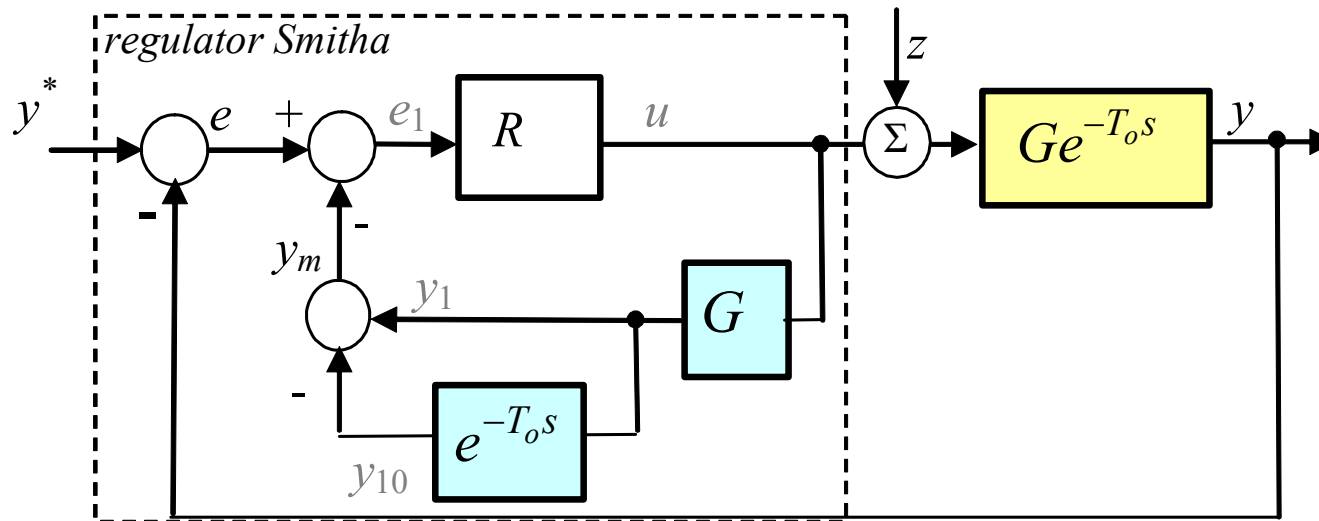
Niektóre układy regulacji z modelem wykazują własności podobne do regulatorów adaptacyjnych, ale mają prostszą strukturę i nie zmieniają nastaw regulatora.

Układy regulacji z modelem – obiekt z opóźnieniem

Idea:

- jeśli nie można zmierzyć wielkości pomocniczej, która nie wykazuje opóźnienia, to trzeba ją wygenerować

► Układ z predyktorem Smitha



- jeden regulator typu PI/PID, ale dwie pętle sprzężenia
- warunkiem zastosowania możliwość wydzielenia opóźnienia w modelu obiektu

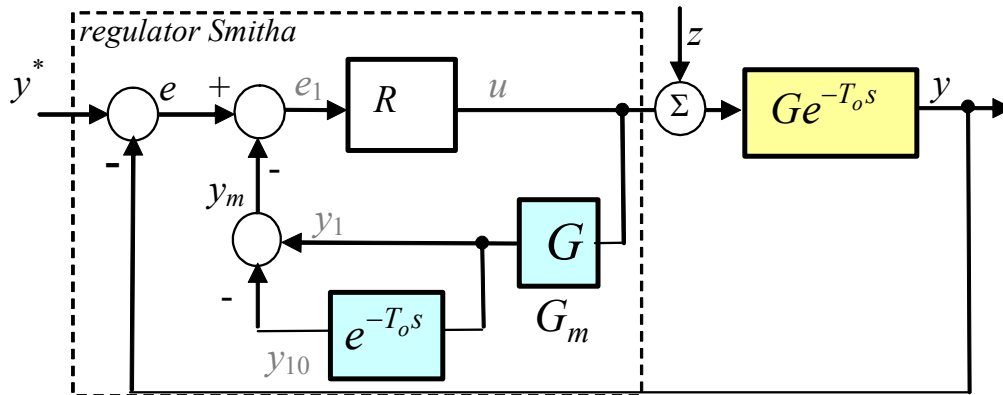
Własności:

- działa szybciej niż układ bez predyktora
- wykazuje większą odporność na zmiany parametrów niż układ bez predyktora

W lit. regulator Smitha jest też kwalifikowany jako szczególny przypadek sterowania predykcyjnego
Uwaga: nie mylić z MPC.

Układy regulacji z modelem – obiekt z opóźnieniem

► Układ z predyktorem Smitha



$$\begin{cases} e = y^* - y \\ e_1 = e - y_m \\ y_m = y_1 - e^{-T_0s} y_1 \\ y_1 = Gu \\ u = Re_1 \\ y = Ge^{-T_0s} (u + z) \end{cases}$$

Założenie: model obiektu jest dokładny ($G_m = G$)

$$y = \frac{RG}{1+RG} e^{-T_0s} y^* + \frac{1+RG(1-e^{-T_0s})}{1+RG} Ge^{-T_0s} z$$

①

- Projektowanie jak dla obiektu bez opóźnienia
- Odpowiedź y będzie z opóźnieniem T_0

②

Gdy $|R(j\omega)G(j\omega)| \gg 1$

$$y = e^{-T_0s} y^* + G(e^{-T_0s} - e^{-2T_0s})z$$

②

Po czasie T_0 zakłócenie z pojawia się na wyjściu

Po czasie $2T_0$ zakłócenie z jest niwelowane (odejmowane)

Czas eliminowania zakłócenia = $2T_0$

①

Dla $z=0$

$$\begin{cases} e_1 = y^* - y - y_m \\ y_m = Gu - e^{-T_0s} Gu \\ y = Ge^{-T_0s} u \\ u = Re_1 \end{cases}$$

Po podstawieniu y i y_m

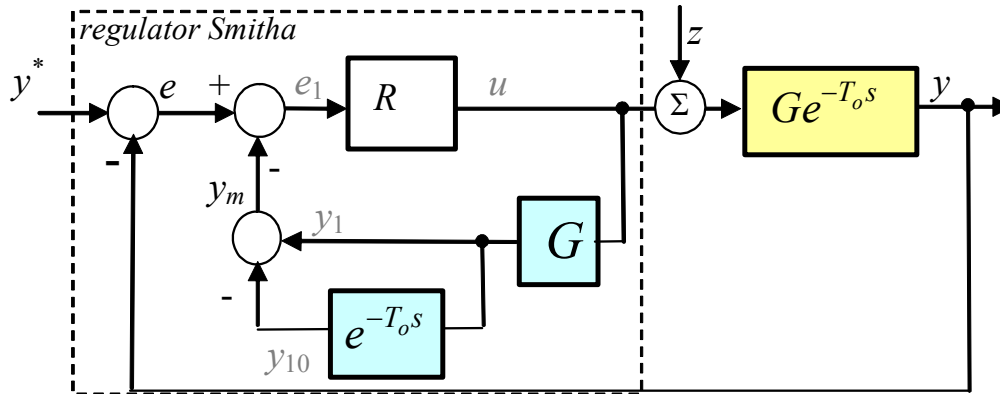
$$\begin{cases} e_1 = y^* - Ge^{-T_0s} u - G_1 u + e^{-T_0s} Gu \\ u = Re_1 \\ e_1 = y^* - Gu \\ u = Re_1 \end{cases}$$

Błąd e_1 (wejście regulatora) jak dla obiektu bez opóźnienia

Układy regulacji z modelem – obiekt z opóźnieniem

► Układ z predyktorem Smitha

Wyznaczanie parametrów regulatora Smitha metodami reduktów



$$y = \frac{RG}{1+RG} e^{-T_0s} y^* + \frac{1+RG(1-e^{-T_0s})}{1+RG} Ge^{-T_0s} z$$

$$G = \frac{k}{Ts+1} = \frac{L}{M}$$

$$e^{-T_0s} \approx \frac{L_p}{M_p}$$

$$R = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = \frac{L_R}{M_R}$$

$$G_z = \frac{y}{y^*} = \frac{RG}{1+RG} e^{-T_0s} = \frac{LL_p L_R}{MM_p M_R + LL_p L_R}$$

$$G_z = \frac{c_4 s^4 + c_3 s^3 + c_2 s^2 + c_1 s + c_0}{d_4 s^4 + d_3 s^3 + d_2 s^2 + d_1 s + d_0}$$

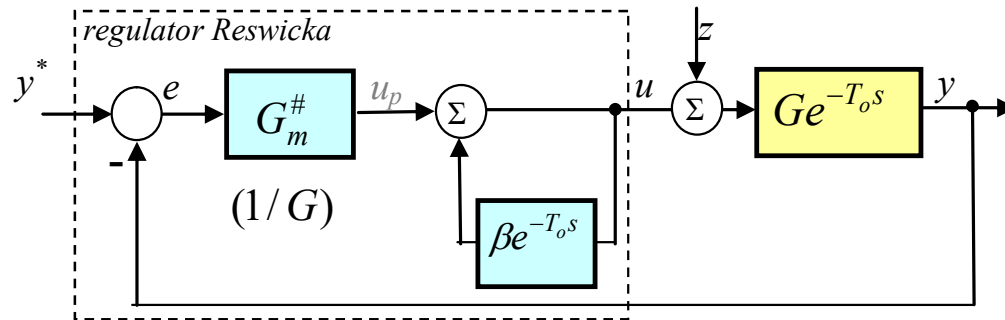
- Rozwinięcie w ułamek łańcuchowy V.
- Wybranie reduktu.
- Porównanie współczynników reduktu i transmitancji o założonych (oczekiwanych) wartościach

Układy regulacji z modelem – obiekt z opóźnieniem

Idea:

- algorytm regulatora opiera się na odwrotnym modelu

▶ Regulator Reswicka



$$\begin{cases} e = y^* - y \\ u_p = G_m^{\#} e \\ u = u_p + \beta e^{-T_0 s} u \\ y = G e^{-T_0 s} (u + z) \end{cases}$$

$$y = \frac{G_m^{\#} G e^{-T_0 s}}{1 + G_m^{\#} G e^{-T_0 s} - \beta e^{-T_0 s}} y^* + \frac{1 - \beta e^{-T_0 s}}{1 + G_m^{\#} G e^{-T_0 s} - \beta e^{-T_0 s}} G e^{-T_0 s} z$$

Założenie: model obiektu jest dokładny ($G_m = G$), oraz

$$G_m^{\#} = G_m^{-1}$$

$$y = \frac{e^{-T_0 s}}{1 + e^{-T_0 s} - \beta e^{-T_0 s}} y^* + \frac{1 - \beta e^{-T_0 s}}{1 + e^{-T_0 s} - \beta e^{-T_0 s}} G e^{-T_0 s} z, \beta \leq 1$$

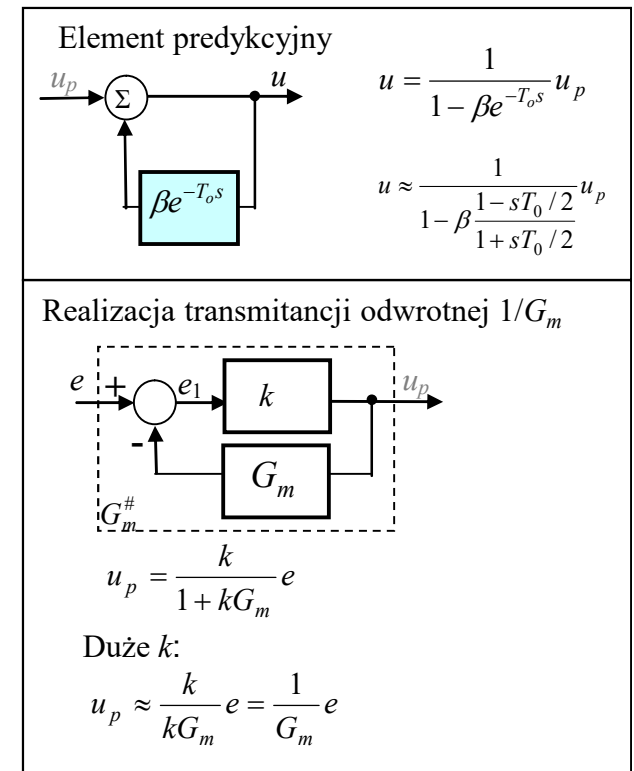
Dla $\beta=1$ (na granicy stabilności)

$$y = e^{-T_0 s} y^* + G(e^{-T_0 s} - e^{-2T_0 s})z$$

Takie same jak uproszczone transmitancje ukł. Smitha

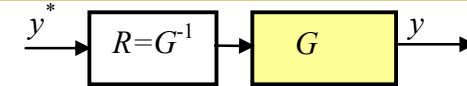
Odporność:

- odporny na zwiększenie T , zmniejszenie k ,
- nieodporny na zmniejszenie T , zmiany T_0 , zwiększenie k ,

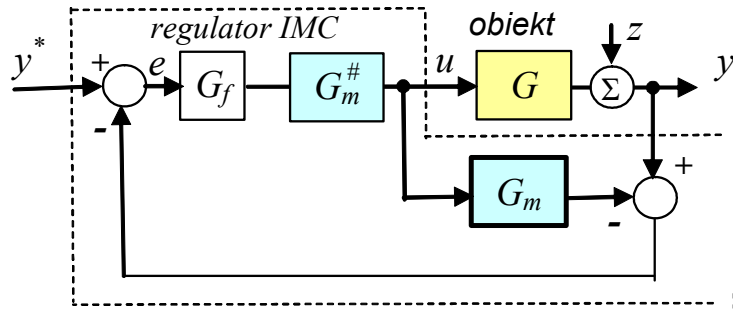


Sterowanie z wewnętrznym modelem - IMC (Internal Model Control)

Idea: Regulator zawiera jakąś reprezentację obiektu



Idealne sterowanie na podstawie modelu



$$y = \frac{G_f G_m^\# G y^* + (1 - G_f G_m^\# G_m) z}{1 + G_f G_m^\# (G - G_m)} \quad e = \frac{y^* - z}{1 + G_f G_m^\# (G - G_m)}$$

1° Jeśli model obiektu jest dokładny ($G_m = G$):

$$y = G_f G_m^\# G y^* + (1 - G_f G_m^\# G) z \quad e = y^* - z$$

2° Jeśli 1° oraz filtr $G_f = 1$ i $G_m^\# = G_m^{-1}$

$$y = y^* \quad \text{dokładność} \quad e = y^* - z$$

Regulator składa się:

- z modelu obiektu (G_m)
- odwrotności modelu obiektu ($G_m^\#$)
- filtra dolnoprzepustowego (G_f)

$$\begin{cases} e = y^* - (y - G_m u) & \leftarrow \text{Regulator} \\ u = G_f G_m^\# e & \leftarrow \text{Regulator} \\ y = Gu + z \end{cases}$$

Regulator IMC

$$u = \frac{G_f G_m^\#}{1 - G_f G_m^\# G_m} (y^* - y) = R(y^* - y)$$

Sterowanie z wewnętrznym modelem - IMC (Internal Model Control)

Realizacja IMC za pomocą PID

Regulator IMC

$$u = \frac{G_f G_m^\#}{1 - G_f G_m^\# G_m} (y^* - y) = R(y^* - y)$$

Przykład 1 (PI)

Model obiektu: $G_m = \frac{k}{1+sT} e^{-sT_0}$, $e^{-sT_0} \approx 1 - sT_0$

Odwrot. modelu $\approx G_m^\# = \frac{1+sT}{k}$

Filtr: $G_f = \frac{1}{1+sT_f}$

$$R = \frac{G_f G_m^\#}{1 - G_f G_m^\# G_m} = \frac{\frac{1}{1+sT_f} \frac{1+sT}{k}}{1 - \frac{1}{1+sT_f} \frac{1+sT}{k} \frac{k}{1+sT} (1-sT_0)} = \frac{1+sT}{sk(T_0 + T_f)}$$

$$R = \frac{T}{k(T_0 + T_f)} \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)$$

regulator PI

$$K_p = \frac{T}{k(T_0 + T_f)} \quad T_i = T$$

Przykład 2 (PID)

Model obiektu: $G_m = \frac{k}{1+sT} e^{-sT_0}$, $e^{-sT_0} \approx \frac{1-sT_0/2}{1+sT_0/2}$

Odwrot. modelu $\approx G_m^\# = \frac{1+sT}{k}$

Filtr: $G_f = \frac{1}{1+sT_f}$

$$R = \frac{G_f G_m^\#}{1 - G_f G_m^\# G_m} = \frac{\frac{1}{1+sT_f} \frac{1+sT}{k}}{1 - \frac{1}{1+sT_f} \frac{1+sT}{k} \frac{k}{1+sT} \frac{1-sT_0/2}{1+sT_0/2}} =$$

$$R = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right)$$

regulator PID

Sterowanie z wewnętrznym modelem - IMC (Internal Model Control)

Realizacja IMC za pomocą PID – Skogestad's IMC

Przykład 1 (PI)

Model obiektu: $G = \frac{k}{Ts + 1} e^{-sT_0}$

Transmitancja ukł.regulacji

$$G_z = \frac{1}{1 + T_z s} e^{sT_0}$$

T_z – zadana wartość stałej czasowej UR

T_0 – opóźnienie takie jak obiektu

Regulator

$$R = \frac{1}{G} \frac{G_z}{1 - G_z} \leftarrow G_z = \frac{RG}{1 + RG}$$

$$R = \frac{1}{G} \frac{\frac{1}{1 + T_z s} e^{sT_0}}{1 - \frac{1}{1 + T_z s} e^{sT_0}} = \frac{1}{G} \frac{e^{sT_0}}{1 + T_z s - e^{sT_0}}$$

+ model obiektu

$$R = \frac{1}{\frac{k}{1 + Ts} e^{sT_0}} \frac{e^{sT_0}}{1 + T_z s - e^{sT_0}} = \frac{1 + Ts}{k(1 + T_z s - e^{sT_0})}$$

$$e^{-sT_0} \approx 1 - sT_0$$

$$R = \frac{T}{k(T_z + T_0)} \left(1 + \frac{1}{Ts}\right) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)$$

$$K_p = \frac{T}{k(T_z + T_0)} \quad T_i = T$$

Matlab:

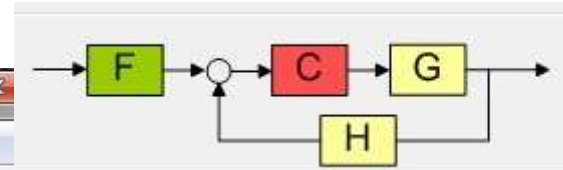
T_z – dominant closed-loop time constant

Patrz też Skogestad's IMC w M.zawansowane – metody algebraiczne

Astrom zalicza SIMC do projektowania PID metodami algebraicznymi

[Pid controllers; Astrom/195-196]

sisotool(*obiekt_lti, regulator*)



The screenshot shows the 'Control and Estimation Tools Manager' window. The 'Automated Tuning' tab is selected. The 'Design method' is set to 'PID Tuning'. The 'Compensator' is set to 'C' with a value of 91.467. Under 'Specifications', the 'Tuning method' is set to 'Classical design formulas' (circled in red). The 'Design options' section shows 'Controller Type' set to 'PI'. The 'Formula' dropdown menu is open, showing options like 'Approximate MIGO frequency response', 'Approximate MIGO step response', 'Chien-Hrones-Reswick', and 'Skogestad IMC' (highlighted with a red box). A red arrow points from this box to the 'Internal Model Control (IMC) Tuning' option in the zoomed-in view below.

This is a zoomed-in view of the 'Internal Model Control (IMC) Tuning' settings. The 'Design method' is 'Internal Model Control (IMC) Tuning'. The 'Compensator' is 'C' with a value of 91.467. Under 'Specifications', the 'Dominant closed-loop time constant' is set to 0.19562 (underlined in red). The 'Desired controller order' is set to 2 (indicated by a red box with the number 2).

The screenshot displays the sisotool software interface. The 'Tuning Methods' menu is open, showing options for graphical tuning (Bode Editor, Closed-Loop Bode Editor, Root Locus Editor, Nichols Editor) and automated tuning (PID, LQG Synthesis, and IMC). The IMC option is highlighted with a red circle. A red arrow points from the IMC option to the 'Internal Model Control (IMC) Tuning' dialog box. The dialog box shows the compensator transfer function $C = 1 \times \frac{(1+s)}{s}$, the selected loop 'LoopTransfer_C', and the dominant closed-loop time constant set to 0.195603722266989. The desired controller order is set to 2. The 'Update Compensator' and 'Help' buttons are visible at the bottom of the dialog box.

CONTROL SYSTEM | **BODE EDITOR** | **VIEW**

Open Session | Save Session | Edit Architecture | Multimodel Configuration | **Tuning Methods** | New Plot | Store | Retrieve | Compare | Export | Preferences

GRAPHICAL TUNING

- Bode Editor**: Edit feedback loop using Bode plot
- Closed-Loop Bode Editor**: Edit closed loop using Bode plot
- Root Locus Editor**: Edit compensators using root locus plot
- Nichols Editor**: Edit feedback loop using Nichols plot

AUTOMATED TUNING

- PID**: PID Tuning: Tune PID compensator using robust response time or classical methods
- LQG Synthesis**: Obtain feedback compensator using Linear-Quadratic-Gaussian design
- IMC**: Internal Model Control (IMC) Tuning: Obtain feedback compensator using IMC design

Internal Model Control (IMC) Tuning

Compensator: $C = 1 \times \frac{(1+s)}{s}$

Select Loop to Tune: LoopTransfer_C

Specifications

Dominant closed-loop time constant: 0.195603722266989

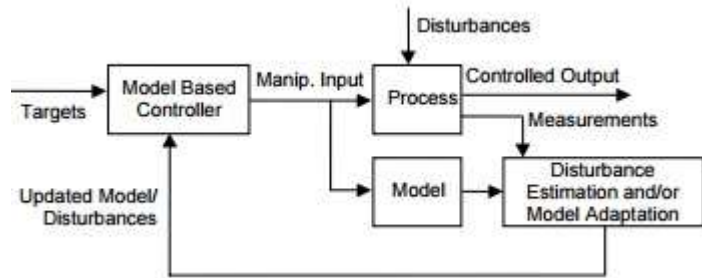
Desired controller order: 2

Update Compensator | Help

Regulatory z modelem - MBC (Model Based Control)

Idea MBC: Zamiast czekać na reakcję obiektu regulować na podstawie modelu + adaptacja do zmian

adaptacyjny?

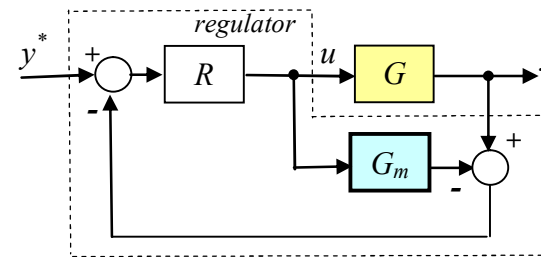
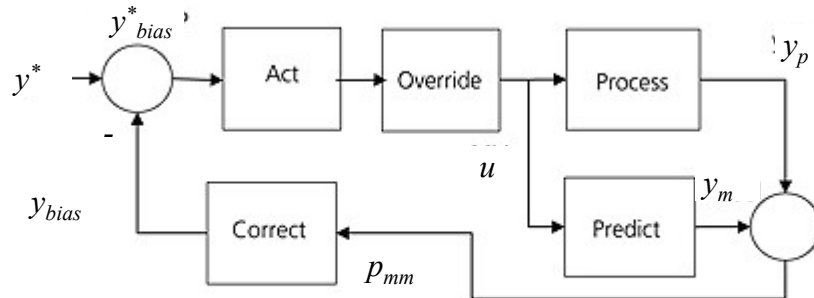


<http://www.acsitoledo.com/PID%20vs.%20MBC.pdf>

Idea PMBC (podejście MISO z pojedynczym wyprzedzeniem)

– zawiera nieliniowy model procesu do predykcji zachowania obiektu

MPC?



y_p - pomiar
 y_m - wyjście z modelu,
 u - sterowanie,
 d - zakłócenia,
 p - parametry modelu
 p_{mm} - poprawka

Trzy funkcje (realizowane różnymi technikami):

- przewidywanie – oblicz y_m na podstawie próbek z przeszłości $y_{m,i} = y_{m,i-1} + \Delta t \cdot f(y_m, u, d, p)_{i-1}$
- poprawka (niedopasowanie modelu) – $p_{mm} = y_p - y_m$

- działanie – oblicz sterowanie: cel: $\frac{dy_m}{dt} \text{ zadany} = \frac{y_{bias}^* - y_m}{\tau}$ obliczenie: $u = f^{-1} \left(\frac{y_{bias}^* - y_m}{\tau}, y_m, d, p \right)_{i-1}$

Własności PMBC:

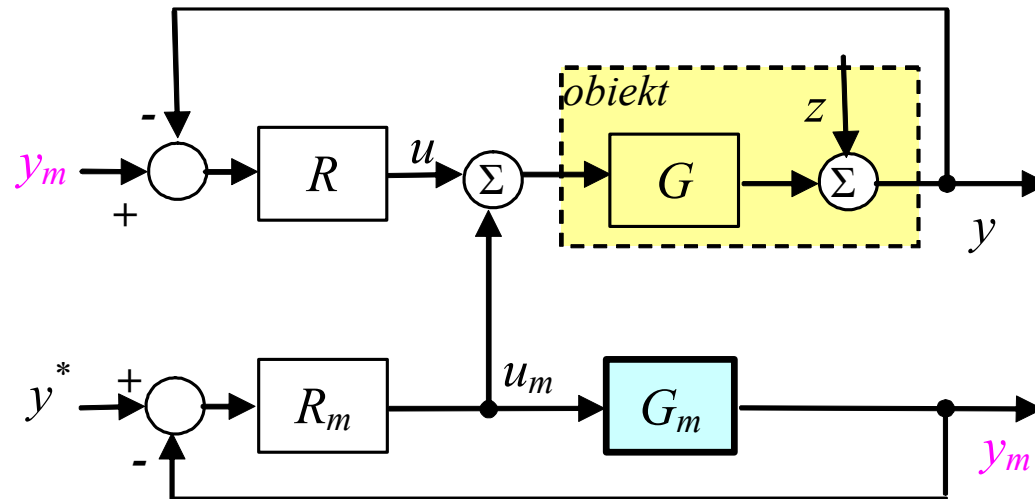
- pojedynczy parametr do strojenia: τ – współczynnik agresywności regulatora,
- regulator nieliniowy (nieliniowa kompensacja w całym zakresie działania)
- zachowuje wiedzę o procesie i zapewnia ciągle monitorowanie procesu

<https://www.isa.org/standards-publications/isa-publications/intech-magazine/2013/april/process-automation-simple-model-based-process-control/>

Uwaga: Nie mylić MBC z Model Based Control Design – metody doboru nastaw na podstawie modelu

Regulatory MFC (Model-Following Control)

MFC dedykowane do sytuacji gdy rzeczywisty proces G nie jest do końca znany lub też zmienia się



Sterowanie obiektu za pomocą sumy sygnałów $u_m + u$

Sygnał u_m z regulatora podstawowego R_m , który steruje wprost tylko modelem obiektu G_m

Sygnał u z regulatora korekcyjnego R , na podstawie różnicy:

wyjścia modelu y_m (predykowanej wartości procesu)

zmiennnej procesowej y (rzeczywistego wyjścia obiektu)

Powyższe struktury dwóch regulatorów pozwala na uzyskanie regulacji odpornej
(nie układ odporny, tylko układ o charakterze odpornym)

Literatura:

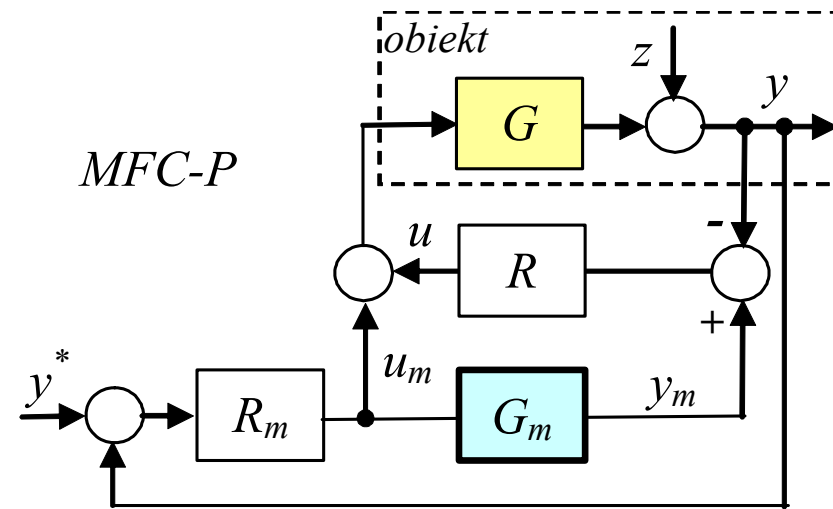
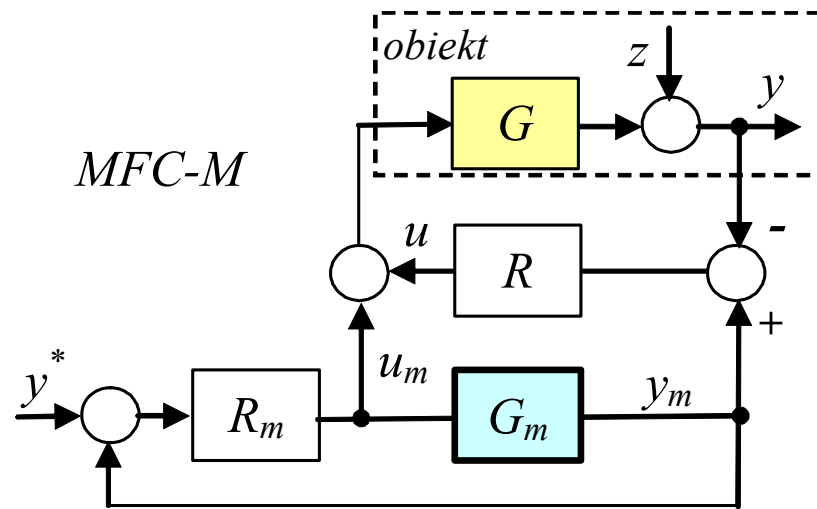
Brzózka J., Regulatory i układy automatyki

Skoczowski St., Osupiuk R., Pietrusiewicz K., **Odporna regulacja PID o dwóch stopniach swobody w praktyce**, Wyd. Naukowe PWN SA, Warszawa 2006

Pietrusiewicz K., Regulacja nadążająca za modelem, Control Engineering Polska, 2007

<http://www.controlengineering.pl/menu-gorne/artukul/article/regulacja-nadazajaca-za-modelem/>

Regulatory MFC (Model-Following Control)



Zastosowanie

Lit.: http://automatykab2b.pl/technika/3931-automatyzacja-obiektow-wielowymiarowych---metodyka-i-przykladowe-wdrozenie-modernizacja-sekcji-usuwania-dwutlenku-wegla-w-zakladach-odazotowywania-krio-odolanow-czesc-2#.VFj8N_mG_4w