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)

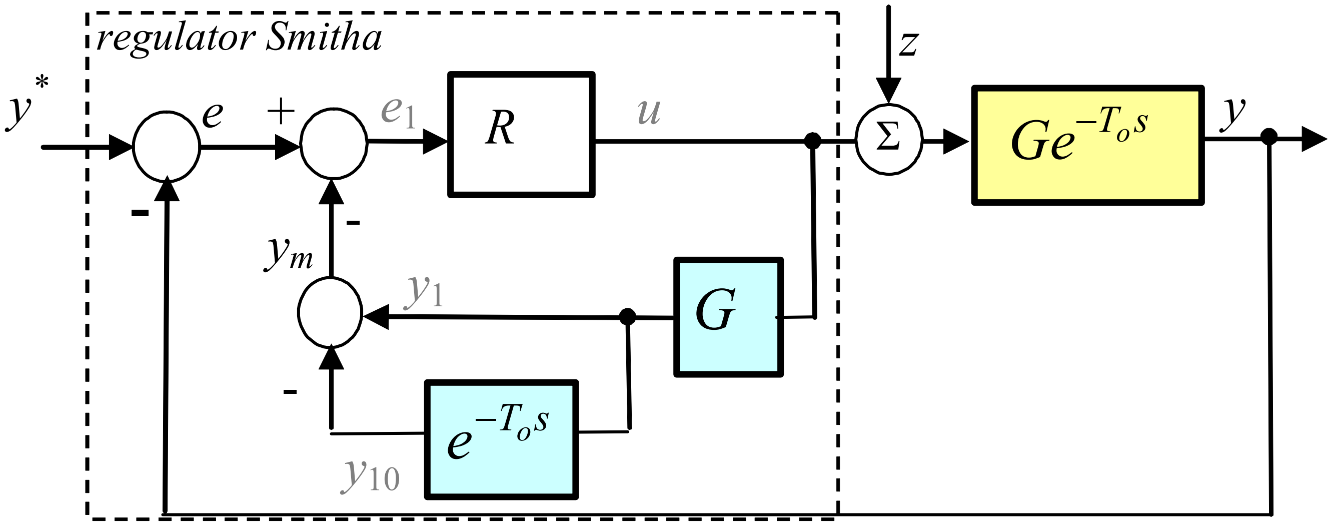
Niektóre układy regulacji z modelem wykazują własności podobne do regulatorów adaptacyjnych, ale mają prostszą strukturę i nie zmieniają nastaw regulatora.

Układy regulacji z modelem – obiekt z opóźnieniem

Idea:

• jeśli nie można zmierzyć wielkości pomocniczniczej, 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:

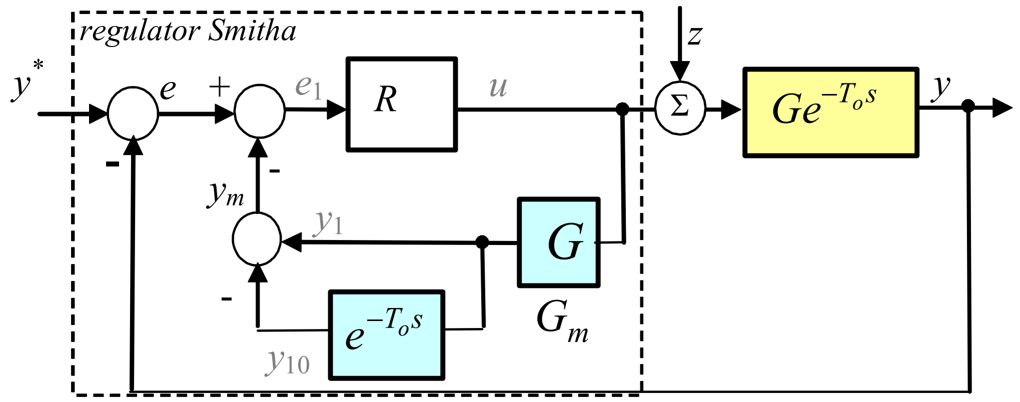
• działa szybciej niż układ bez predyktora

• wykazuje wiekszą 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.

► Układ z predyktorem Smitha



$$\begin{cases} e = y^* - y \\ e_1 = e - y_m \\ y_m = y_1 - e^{-T_0 s} y_1 \\ y_1 = Gu \\ u = Re_1 \\ y = Ge^{-T_0 s}(u + z) \end{cases}$$

Założenie: model obiektu jest dokładny (G_m=G)

$$y = \frac{RG}{1+RG} e^{-T_0 s} y^* \qquad + \frac{1 + RG(1 - e^{-T_0 s})}{1+RG} Ge^{-T_0 s} z$$

1

2

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

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

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

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

$$\begin{cases} e_1 = y^* - y - y_m \\ y_m = Gu - e^{-T_0 s} Gu \\ y = Ge^{-T_0 s} u \\ u = Re_1 \end{cases}$$

Po podstawieniu y i y_m

$$\begin{cases} e_1 = y^* - Ge^{-T_0 s} u - G_1 u + e^{-T_0 s} Gu \\ u = Re_1 \end{cases}$$

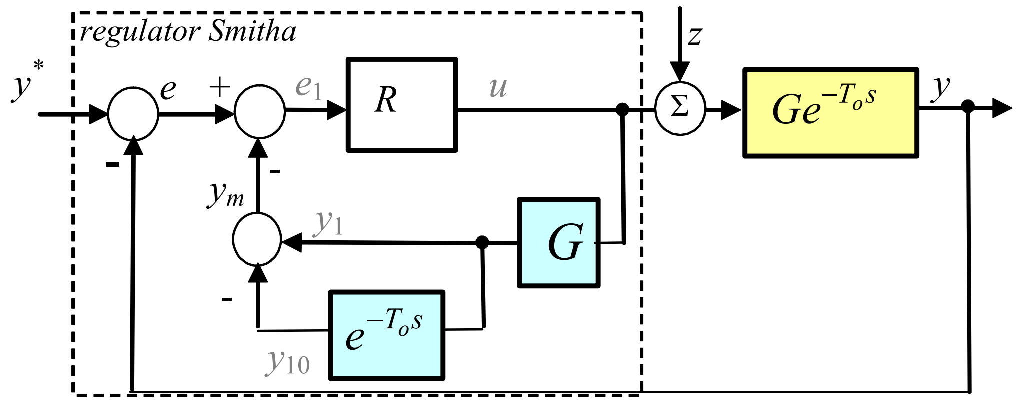
$$\begin{cases} e_1 = y^* - Gu \\ u = Re_1 \end{cases}$$

Błąd e_1 (wejście regulatora) jak dla obiektu bez opóźnienia

[Advanced PID,Astrom/8.2; Brzózka/4.6.4]

► Układ z predyktorem Smitha

Wyznaczanie parametrów regulatora Smitha metodami reduktów



$$y = \frac{RG}{1+RG} e^{-T_0 s} y^* + \frac{1+RG(1-e^{-T_0 s})}{1+RG} Ge^{-T_0 s} z$$

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

$$e^{-T_0 s} \approx \frac{L_p}{M_p}$$

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

$$G_z = \frac{y}{y^*} = \frac{RG}{1+RG} e^{-T_0 s} = \frac{LL_p L_R}{MM_p M_R + LL_p L_R}$$

$$\downarrow$$

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

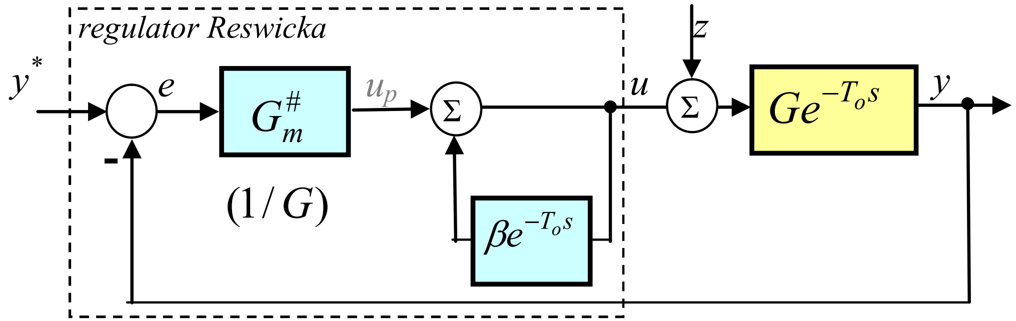
- Rozwinięcie w ułamek łańcuchowy V.
- Wybranie reduktu.
- Porównanie współczynników reduktu i transmitancji o założonych (oczekiwanych) wartościach

Układy regulacji z modelem – obiekt z opóźnieniem

Idea:

• algorytm regulatora opiera się na odwrotnym modelu

► Regulator Reswicka



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

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

Założenie: model obiektu jest dokładny (G_m=G), oraz $G_m^\# = G_m^{-1}$

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

Dla β=1 (na granicy stabilności)

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

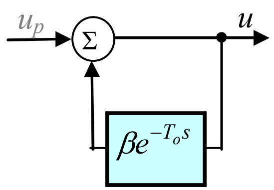
Takie same jak uproszczone transmitancje ukł. Smitha

Odporność:

• odporny na zwiększenie T, zmniejszenie k,

• nieodporny na zmniejszenie T, zmiany T_0, zwiększenie k,

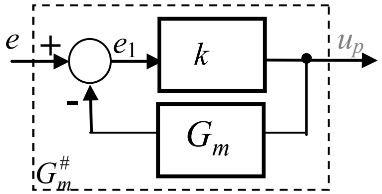
Element predykcyjny



$$u = \frac{1}{1 - \beta e^{-T_0 s}} u_p$$

$$u \approx \frac{1}{1 - \beta \frac{1 - sT_0/2}{1 + sT_0/2}} u_p$$

Realizacja transmitancji odwrotnej $1/G_m$



$$u_p = \frac{k}{1 + kG_m} e$$

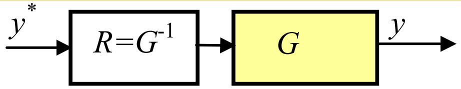
Duże k:

$$u_p \approx \frac{k}{kG_m} e = \frac{1}{G_m} e$$

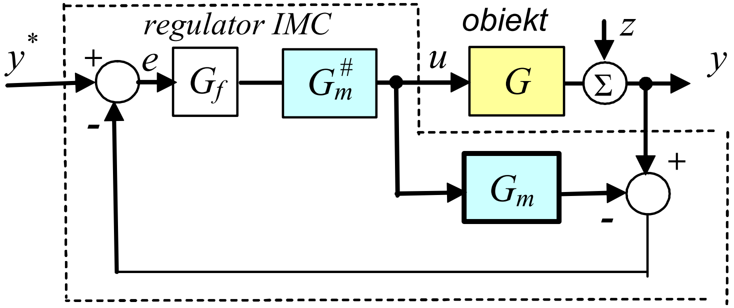
Lit.: [Findeisen, Technika regulacji automatycznej (PWN,Wa-Wa1965)/408][Shinskey/150-154]

Sterowanie z wewnętrzym modelem - IMC (Internal Model Control)

Idea: Regulator zawiera jakąś reprezentację obiektu



Idealne sterowanie na podstawie modelu



Regulator składa się:

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

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

Regulator

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

Regulator IMC

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

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

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

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

$$y = y^* \qquad e = y^* - z$$

dokładność

Realizacja IMC za pomocą PID

Regulator IMC

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

Przykład 1 (PI)

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

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

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

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

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

regulator PI

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

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≈ $G_m^\# = \frac{1+sT}{k}$

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

Astrom zalicza IMC do projektowania PID metodami algebraicznymi

[Pid controllers; Astrom/193-195]

Realizacja IMC za pomocą PID – Skogestad's IMC

Regulator

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

Przykład 1 (PI)

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

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

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

+ model obiektu

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

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

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

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

Matlab:
T_z – dominant closed-loop time constant

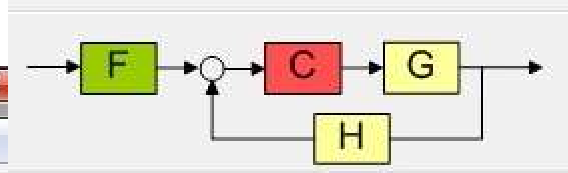
Patrz też Skogestad's IMC w M.zawansowane – metody algebraiczne

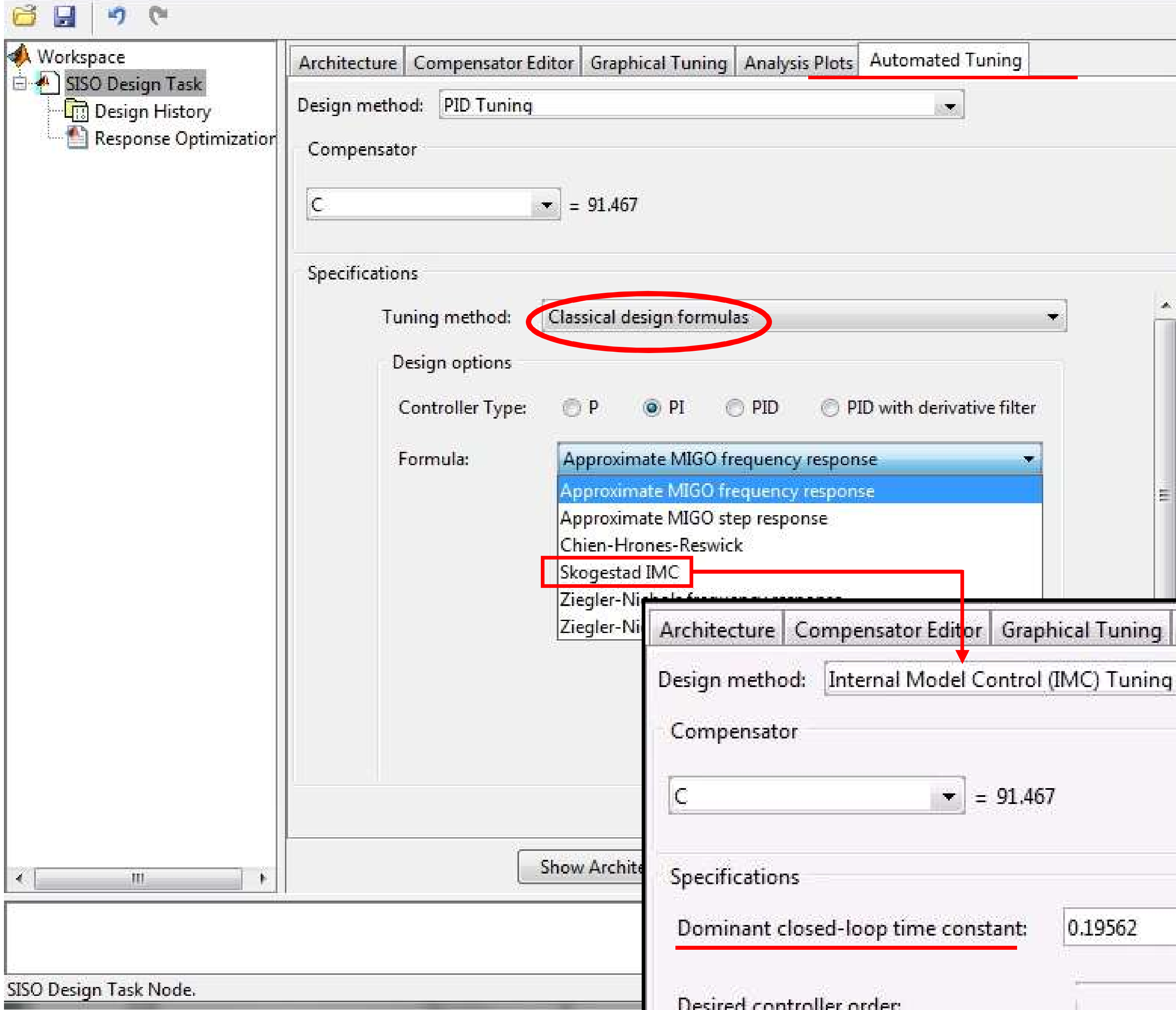
Astrom zalicza SIMC do projektowania PID metodami algebraicznymi

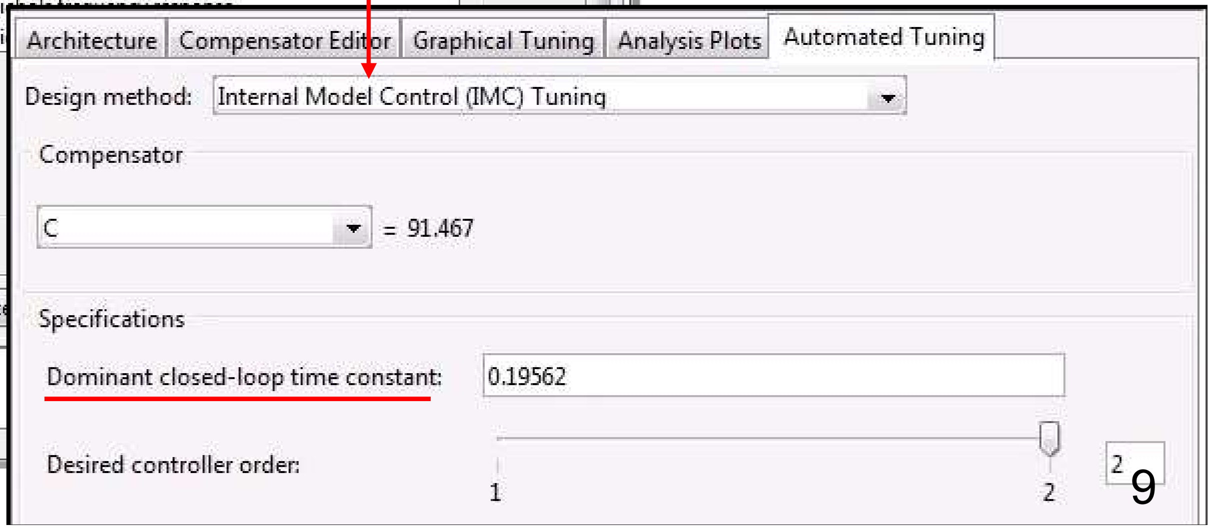
[Pid controllers; Astrom/195-196]

SISO Design (obiekt LTI) – wersja ok.2010r

sisotool(obiekt_lti, regulator)

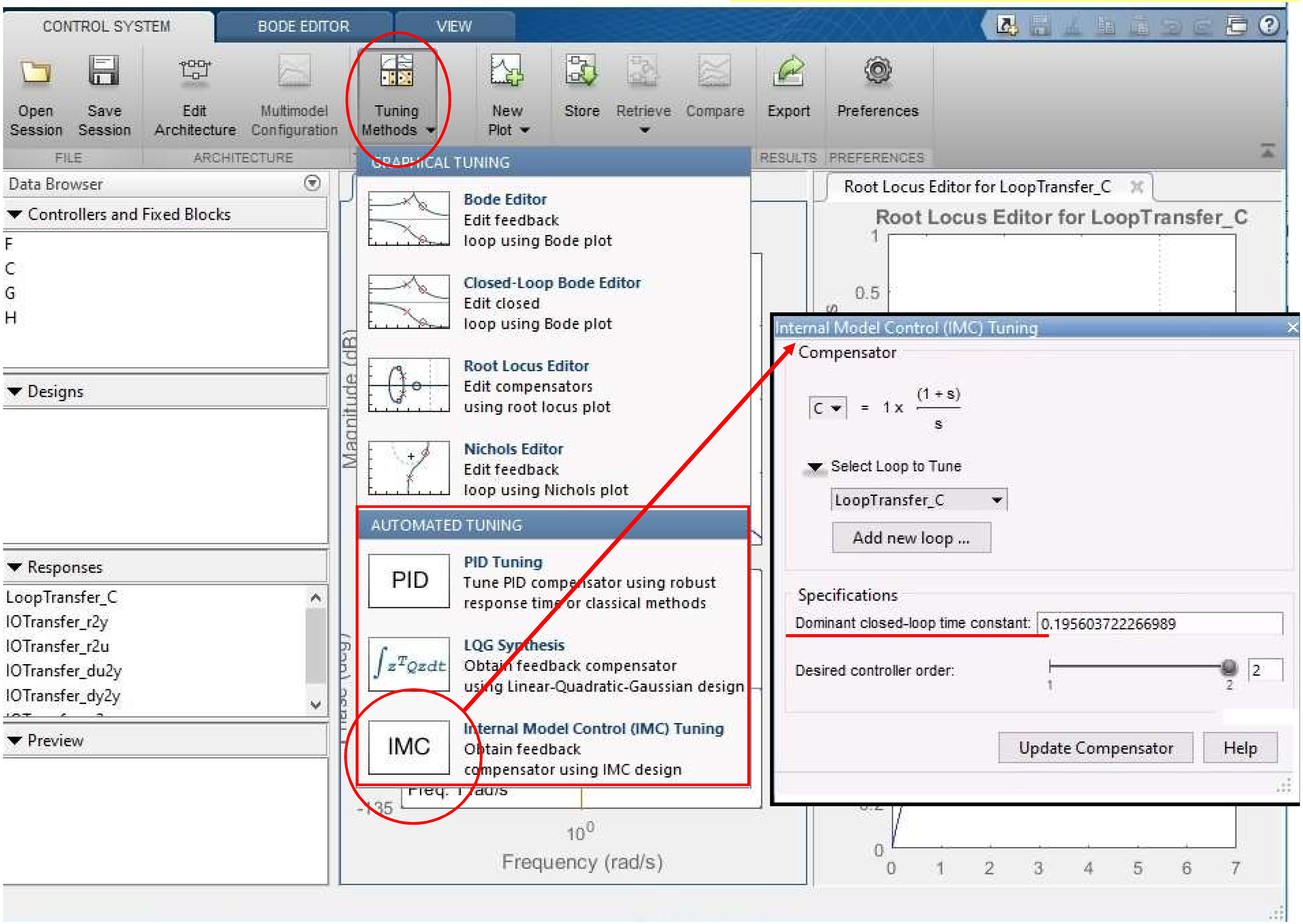






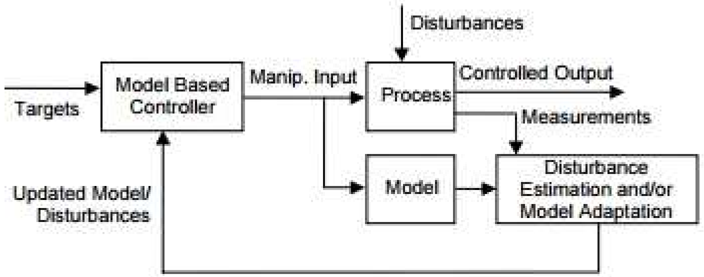
sisotool(obiekt_lti, regulator)

SISO Design (obiekt LTI) – wersja ok.2015r



Regulatory z modelem - MBC (Model Based Control)

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

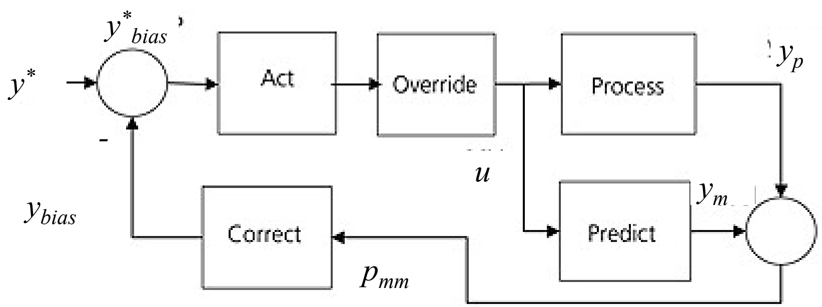


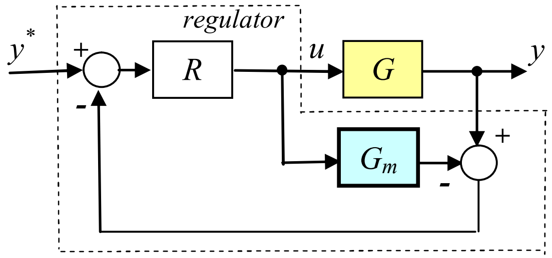
adaptacyjny?

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: $\left.\dfrac{dy_m}{dt}\right|_{zadany} = \dfrac{y^*_{bias} - y_m}{\tau}$ obliczenie: $u = f^{-1}\left(\dfrac{y^*_{bias} - y_m}{\tau}, y_m, d, p\right)_{i-1}$

Własności PMBC:

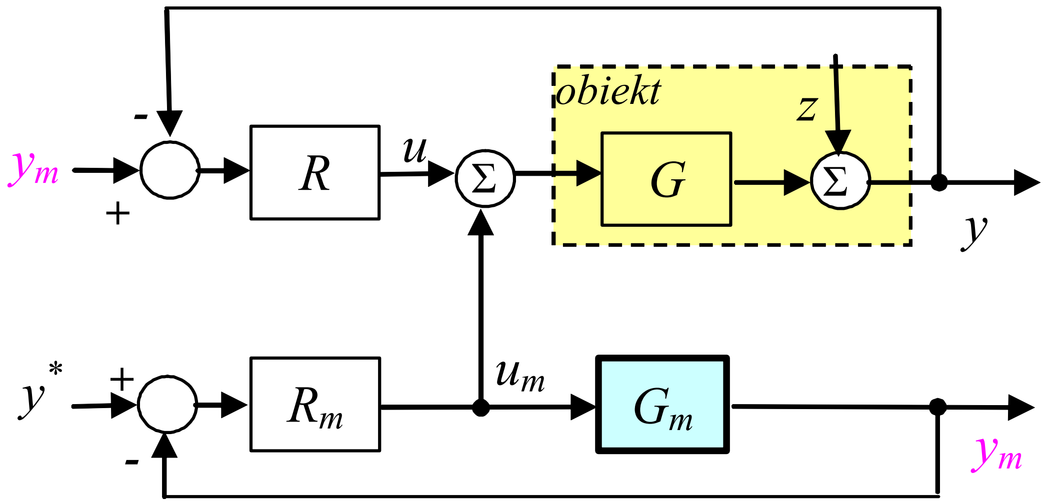
- pojedynczy parametr do strojenia: τ – współczynnik agresywności regulatora,
- regulator nieliniowy (nieliniowa kompensację w całym zakresie działania)
- zachowuje wiedzę o procesie i zapewnia ciągłe monitorowanie procesu

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)

zmiennej procesowej *y* (rzeczywistego wyjścia obiektu)

Powyższe struktury dwóch regulatorów pozwala na uzyskanie regulacji odpornej

(nie układ odporny, tylko układ o charakterze odpornym)

Literatura:

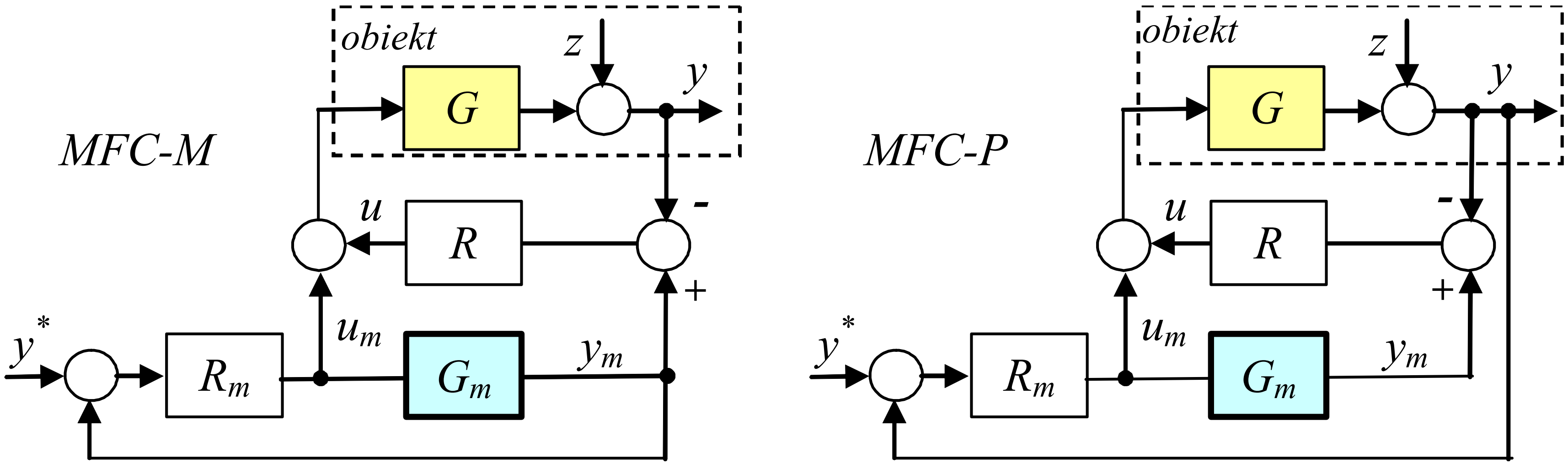
Brzózka J.,Regulatory i układy automatyki

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

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

http://www.controlengineering.pl/menu-gorne/artykul/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