

# 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)

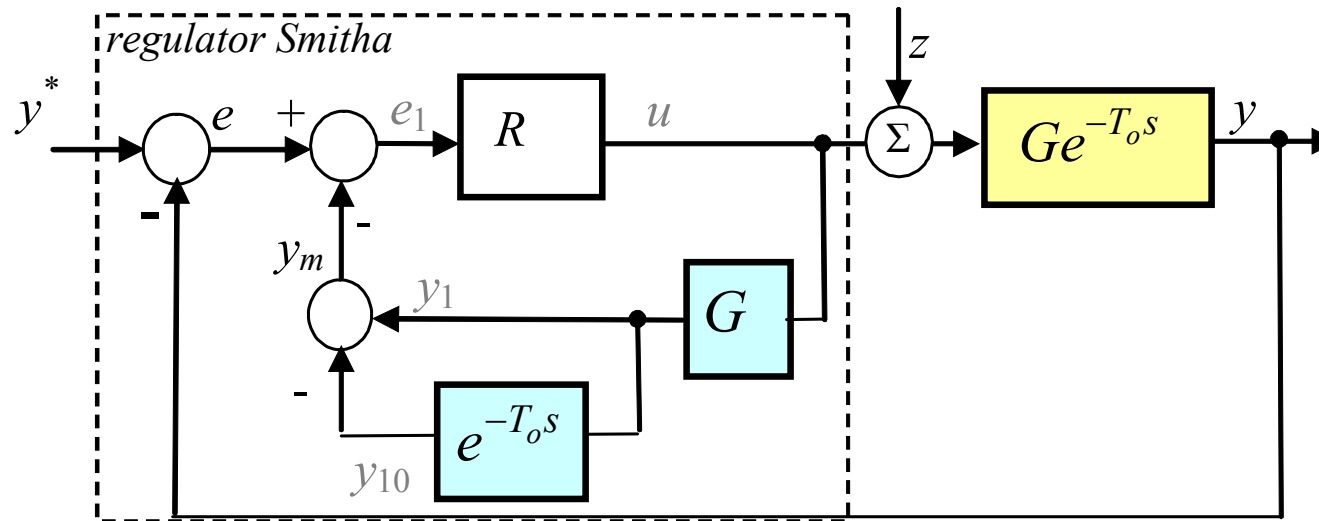
*Niektóre układy regulacji z modelem wykazują własności podobne do regulatorów adaptacyjnych, ale mają prostszą strukturę i nie zmieniają nastaw regulatora.*

## 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:

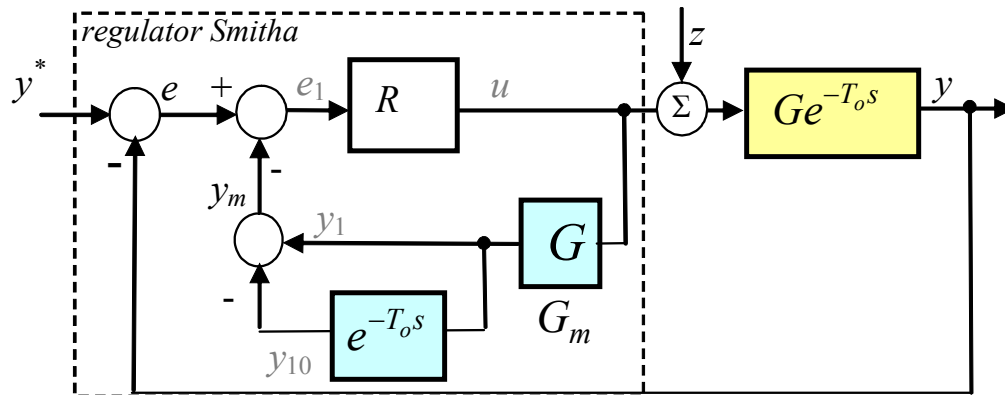
- działa szybciej niż układ bez predyktora
- wykazuje większą odporność na zmiany parametrów niż układ bez predyktora

*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  $z=0$

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

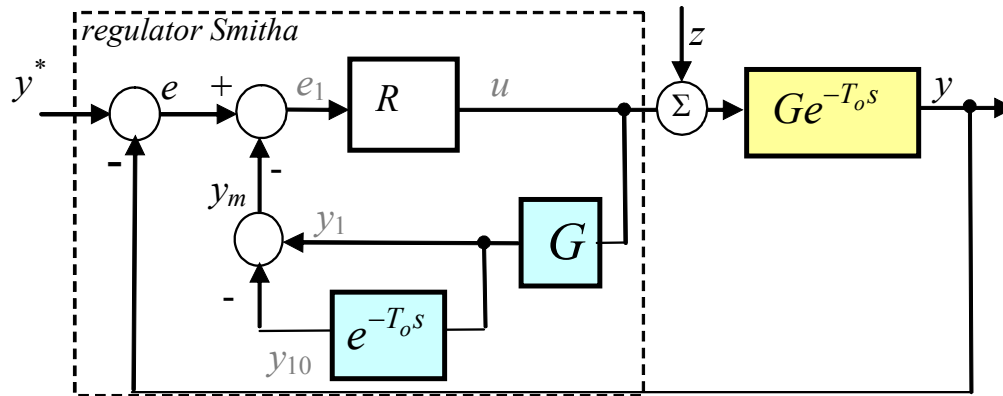
Po podstawieniu  $y$  i  $y_m$

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

Błąd  $e_1$  (wejście regulatora) jak dla obiektu bez opóźnienia

## ► Układ z predyktorem Smitha

Wyznaczanie parametrów regulatora Smitha metodami reduktów



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

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

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

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

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

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

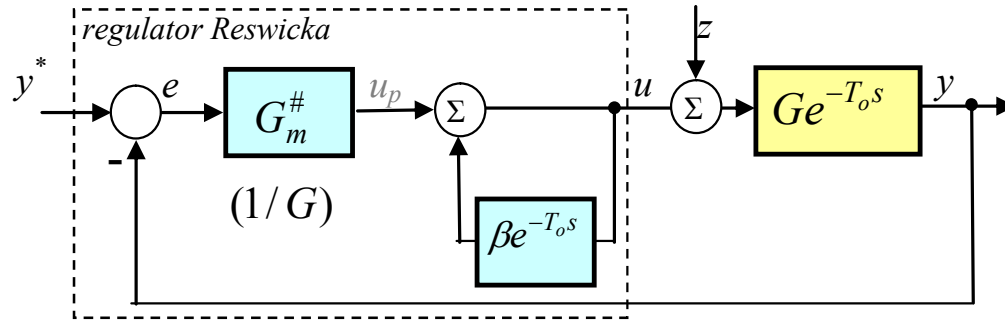
- Rozwinięcie w ułamek łańcuchowy V.
- Wybranie reduktu.
- Porównanie współczynników reduktu i transmitancji o założonych (oczekiwanych) wartościach

# Układy regulacji z modelem – obiekt z opóźnieniem

Idea:

- algorytm regulatora opiera się na odwrotnym modelu

## ► Regulator Reswicka



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

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

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

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

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

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

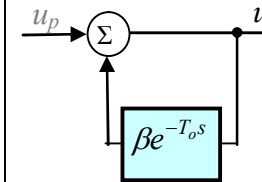
Takie same jak uproszczone transmitancje ukł. Smitha

Odporność:

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

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

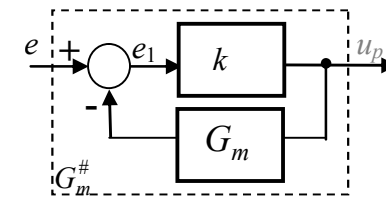
Element predykcyjny



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

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

Realizacja transmitancji odwrotnej  $1/G_m$



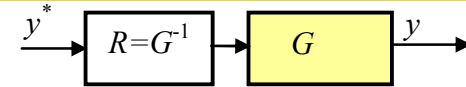
$$u_p = \frac{k}{1 + kG_m} e$$

Duże  $k$ :

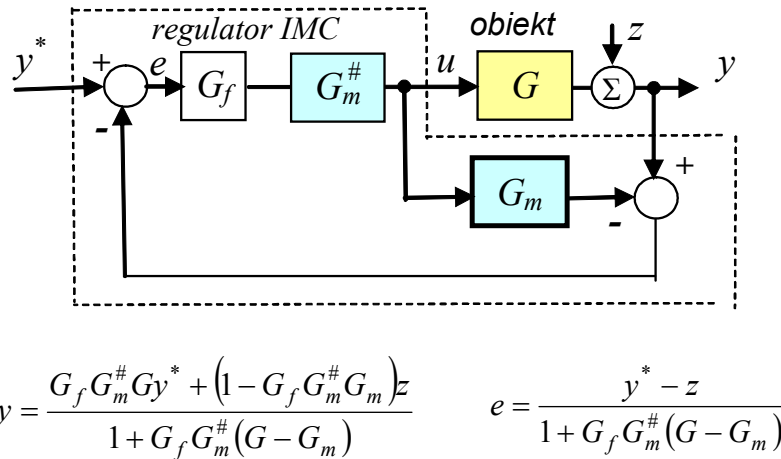
$$u_p \approx \frac{k}{kG_m} e = \frac{1}{G_m} e$$

# Sterowanie z wewnętrznym 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 ( $G_f$ )

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

Regulator IMC

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Matlab:

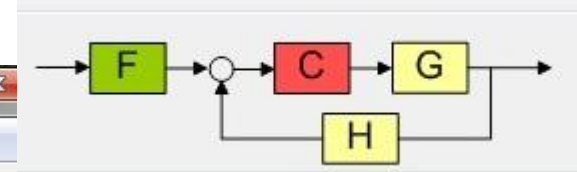
$T_z$  – dominant closed-loop time constant

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

Astrom zalicza SIMC do projektowania PID metodami algebraicznymi



sisotool(obiekt\_lti, regulator)



Control and Estimation Tools Manager

File Edit Help

Workspace

- SISO Design Task
  - Design History
  - Response Optimization

Architecture | Compensator Editor | Graphical Tuning | Analysis Plots | **Automated Tuning**

Design method: PID Tuning

Compensator: C = 91.467

Specifications

Tuning method: **Classical design formulas**

Design options

Controller Type:  P  PI  PID  PID with derivative filter

Formula:

- Approximate MIGO frequency response
- Approximate MIGO step response
- Chien-Hrones-Reswick
- Skogestad IMC**
- Ziegler-Nichols frequency response
- Ziegler-Nichols step response

Architecture | Compensator Editor | Graphical Tuning | Analysis Plots | **Automated Tuning**

Design method: **Internal Model Control (IMC) Tuning**

Compensator: C = 91.467

Specifications

Dominant closed-loop time constant: 0.19562

Desired controller order: 1  2

SISO Design Task Node.

The screenshot displays the sisotool interface in the BODE EDITOR mode. The 'Tuning Methods' menu is open, showing options for manual and automated tuning. The 'IMC' option under 'AUTOMATED TUNING' is highlighted with a red box. A red arrow points from this option to the 'Internal Model Control (IMC) Tuning' dialog box.

**Graphical Tuning Options:**

- 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 Options:**

- 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 Dialog:**

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

Select Loop to Tune: LoopTransfer\_C

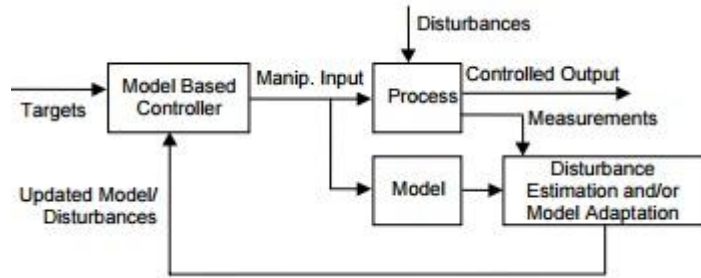
Specifications:

- Dominant closed-loop time constant: 0.195603722266989
- Desired controller order: 2

Buttons: Update Compensator, Help

# Regulatory z modelem - MBC (Model Based Control)

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



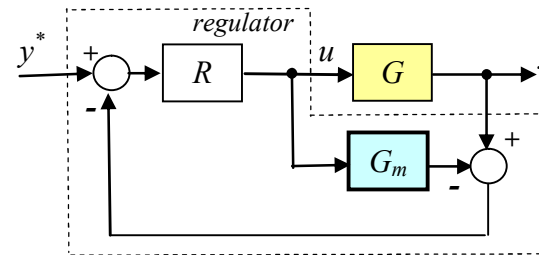
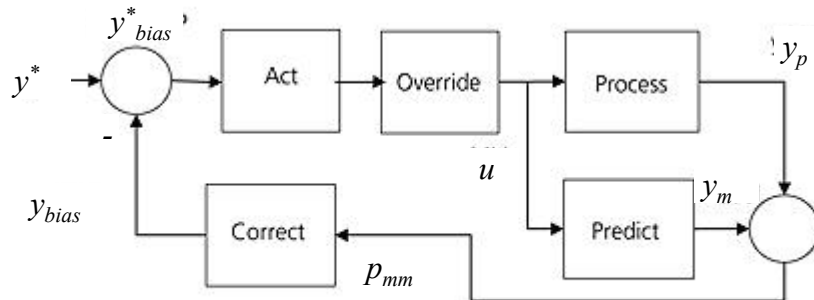
adaptacyjny?

<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 (nieodpasowanie modelu) –  $p_{mm} = y_p - y_m$

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

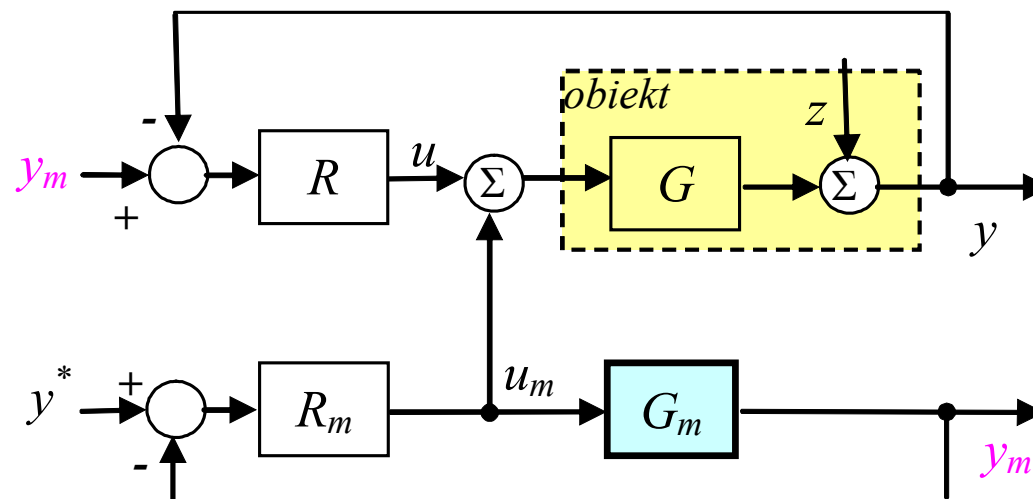
Własności PMBC:

- pojedynczy parametr do strojenia:  $\tau$  – współczynnik agresywności regulatora,
- regulator nieliniowy (nieliniowa kompensację 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/>

## 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)

zmienną procesową  $y$  (rzeczywistego wyjścia obiektu)

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

Literatura:

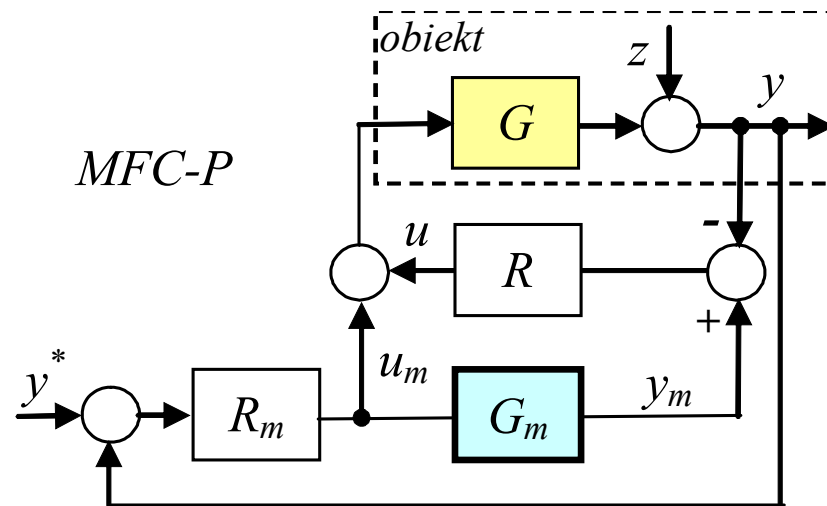
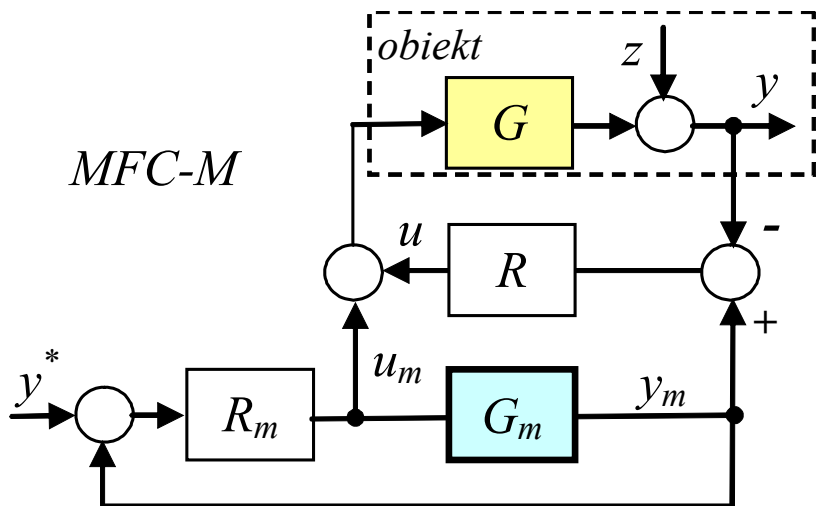
Brzózka J., Regulatory i układy automatyki

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](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)