

## Utrudnienia – trudne przypadki regulacji

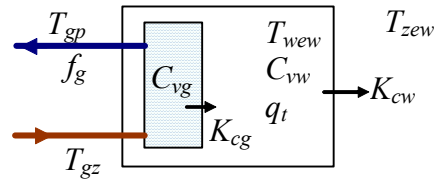
Podstawowe (typowe) utrudnienia dla UR:

- 1) Nieliniowości
- 2) Opóźnienia transportowe
- 3) Wiele obwodów regulacji

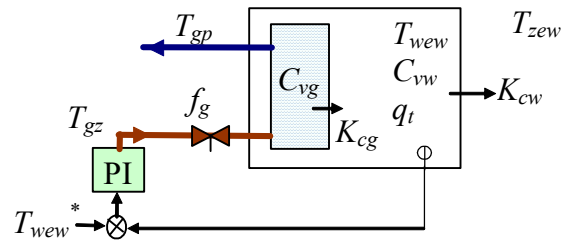
Inne ...

# Utrudnienia – nieliniowość obiektu (przykład)

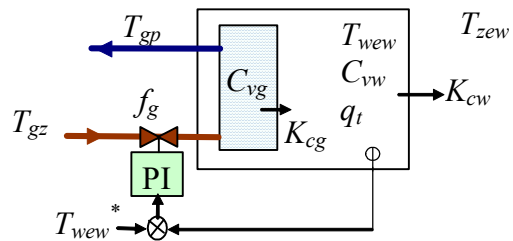
## Przykład nieliniowego obiektu



$$\begin{cases} C_{vw} \dot{T}_{wew} = K_{cg} (T_{gp} - T_{wew}) - K_{cw} (T_{wew} - T_{zew}) + q_t \\ C_{vg} \dot{T}_{gp} = c_{pw} f_{mg} (T_{gz} - T_{gp}) - K_{cg} (T_{gp} - T_{wew}) \end{cases}$$



Sterowanie jakościowe (liniowe)



Sterowanie ilościowe (nieliniowe)

## Utrudnienia – nieliniowość obiektu (problemy)

Obiekty liniowe:

- jeden punkt równowagi
- stabilność/niestabilność globalna
  - jeśli stabilny to stabilny globalnie
  - w każdym punkcie pracy,
  - dla każdej wartości wymuszenia,
- reakcja nie zależy od punktu pracy
  - w każdym punkcie pracy na takie samo zakłócenie obiekt reaguje tak samo

Obiekty nieliniowe:

- jeden/wiele punktów równowagi
- stabilność/niestabilność globalna/lokalna
  - stabilność układu może zależeć od warunków:
    - od punktu pracy,
    - od wartości wymuszenia,
- reakcja zależy od punktu pracy
  - w różnych punktach pracy na takie samo zakłócenie reakcje obiektu są różne

### Identyfikacja modelu

- w jednym, dowolnym punkcie pracy
- ważna w całym zakresie pracy

- w jednym/ w kilku punktach pracy
- ważna w pewnym obszarze wokół punktu pracy

### Regulacja PID

- projekt/optimalizacja w jednym punkcie pracy
- jakość UR taka sama w całym zakresie

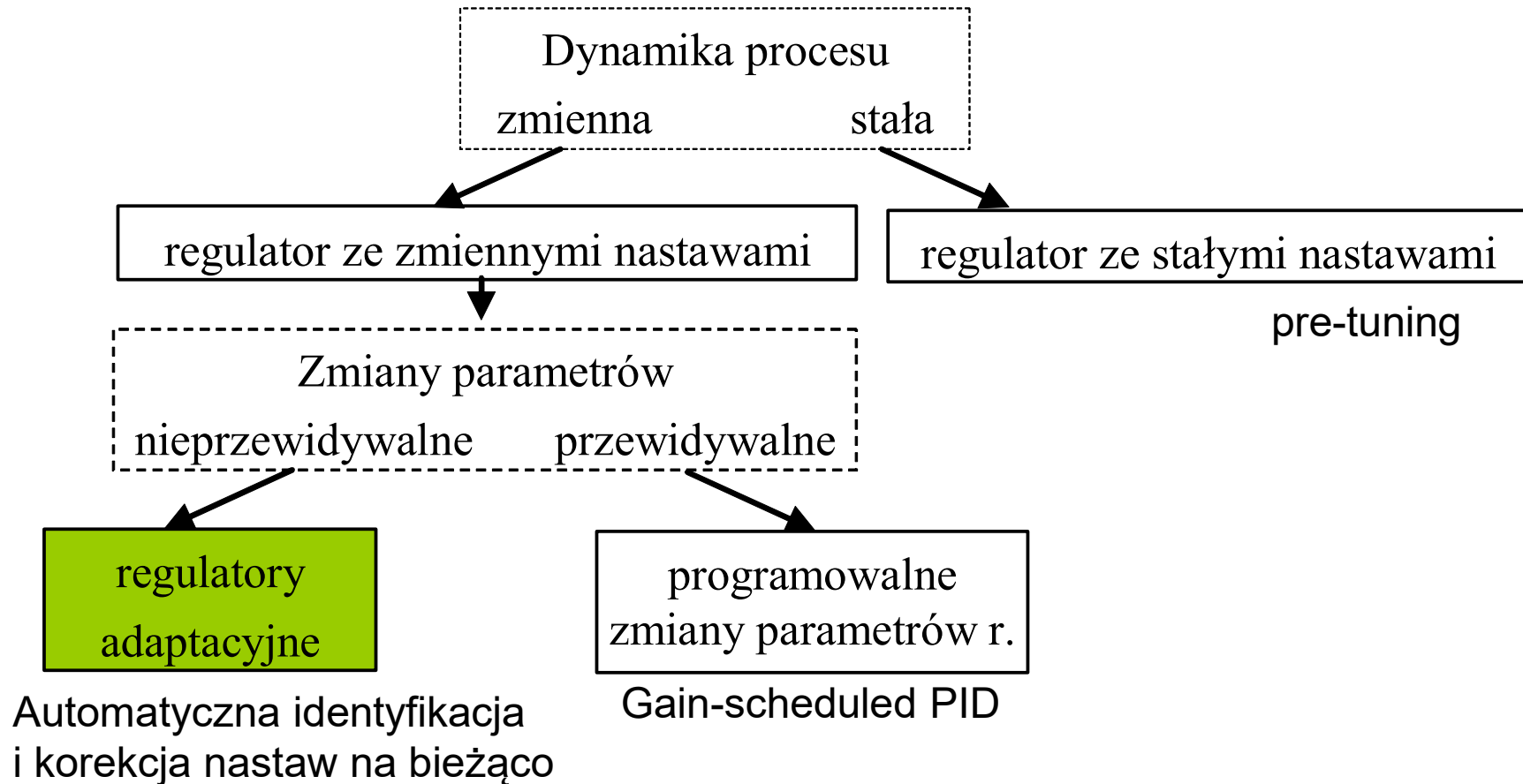
- projekt/optimalizacja w wielu punktach pracy
- jakość/stabilność UR zależy od punktu pracy

Inne rozwiązania

## Utrudnienia – nieliniowość obiektu (rozwiązania)

**Sterowanie adaptacyjne** - polega na dostosowywaniu (adaptacji) nastaw regulatora do zmian parametrów obiektu (w trakcie pracy)

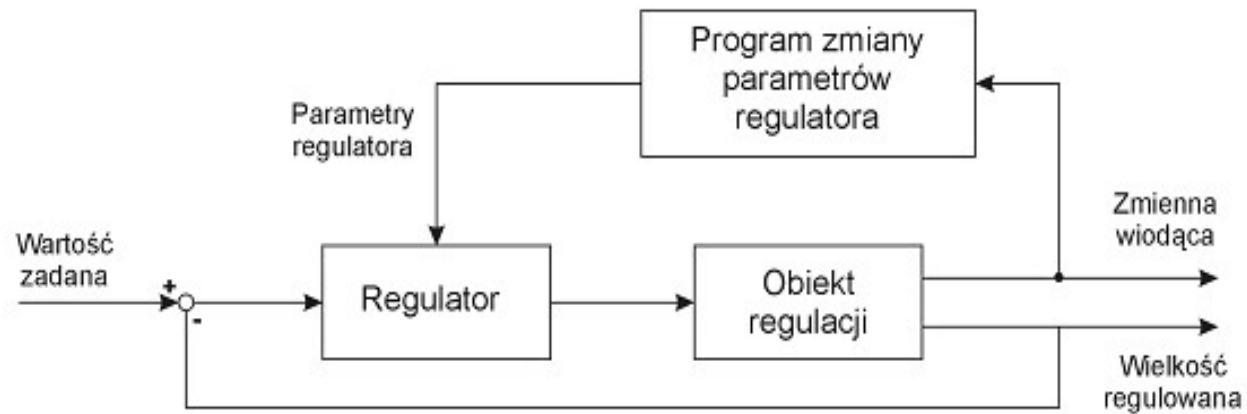
### Techniki adaptacji



**Regulatory nieliniowe**, np. regulator rozmyty (fuzzy controller )

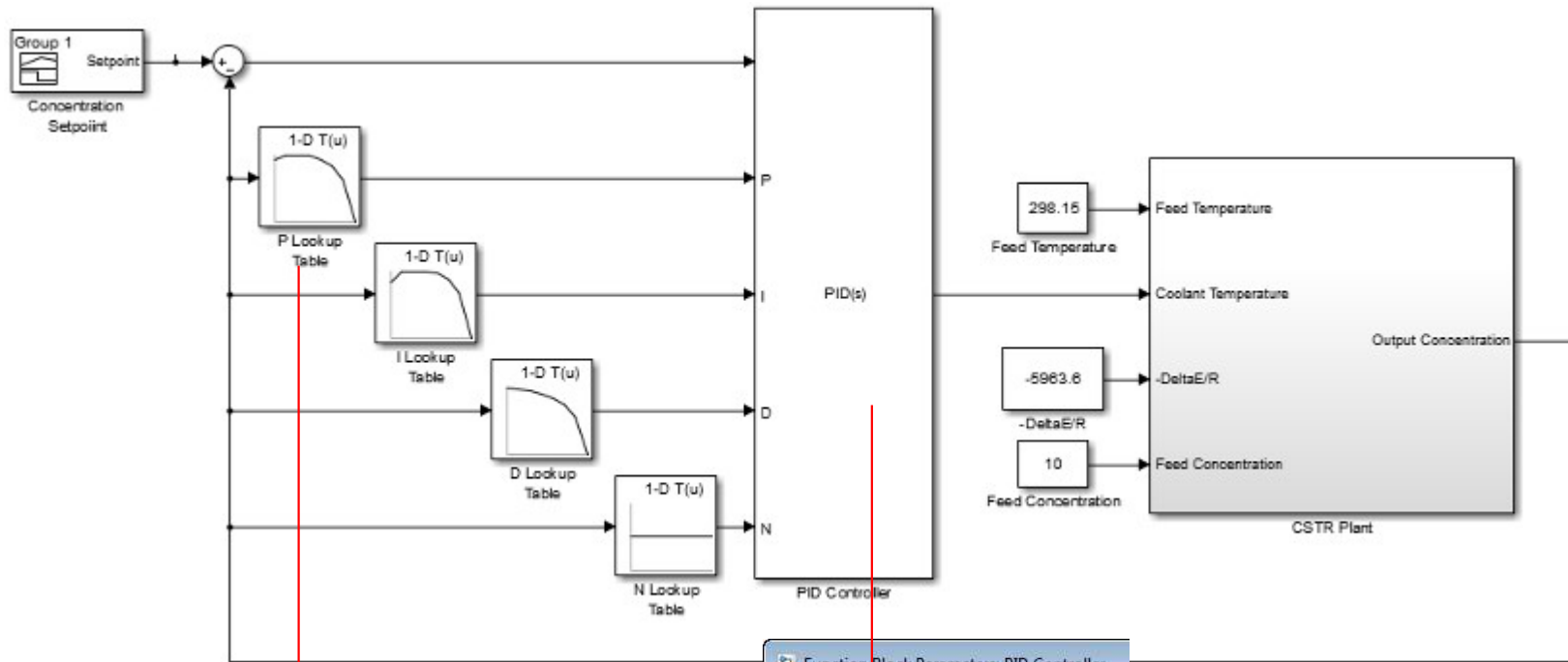
### Układ z programowanymi zmianami parametrów regulatora

#### PID z harmonogramowaniem wzmacnienia (Gain-scheduled PID)



# Układy o charakterze adaptacyjnym

## PID z harmonogramowaniem wzmacnienia (Gain-scheduled PID)



**Function Block Parameters: P Lookup Table**

Lookup Table (n-D)

Perform n-dimensional interpolated table lookup including representation of a function in N variables. Breakpoint set: first dimension corresponds to the top (or left) input port.

Table and Breakpoints    Algorithm    Data Types

Number of table dimensions: 1

Table data: Controllers.Kp

Breakpoints 1: C

Edit table and breakpoints...

**Function Block Parameters: PID Controller**

PID Controller

This block implements continuous- and discrete-time PID control with anti-windup, external reset, and signal track (requires Simulink Control Design).

Controller: PID

Time domain:

Continuous-time

Discrete-time

Main    PID Advanced    Data Types    S

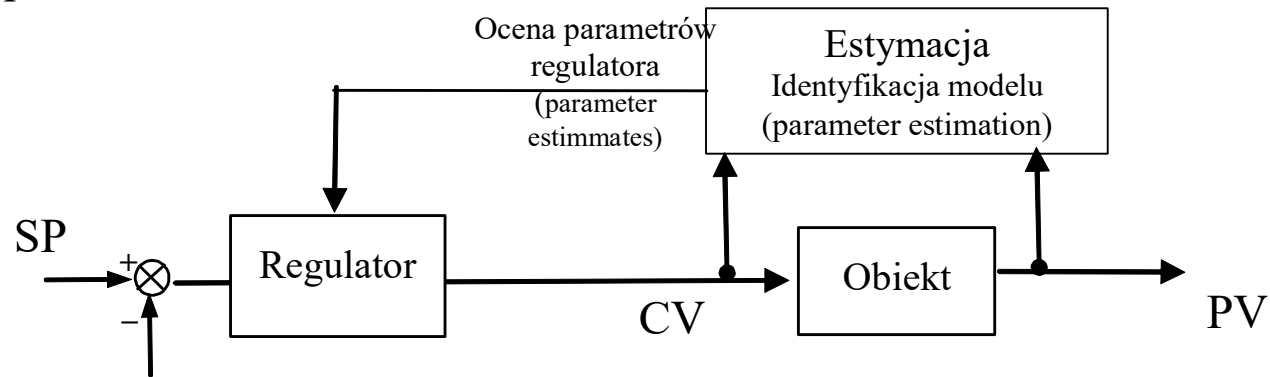
Controller parameters

Source: external

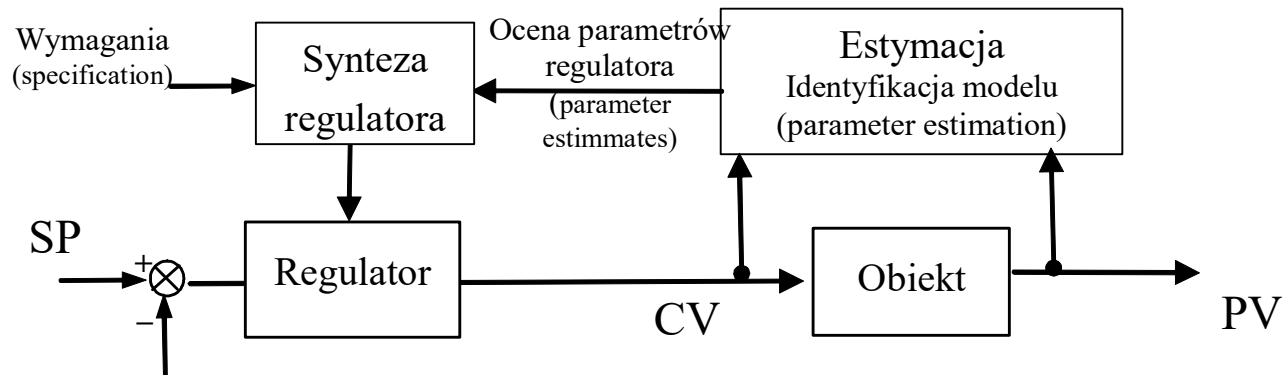
## Układy o charakterze adaptacyjnym

Układy adaptacyjne zawierają w sobie metody estymacji parametrów obiektu (identyfikacji modelu).

Układy bezpośrednie

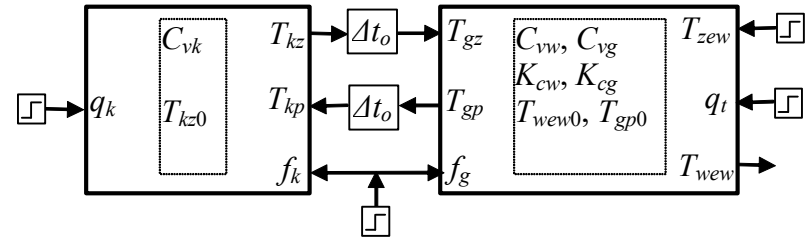
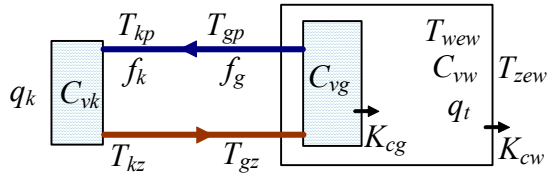


Układy pośrednie



# Utrudnienia – opóźnienie transportowe (przykład)

## Przykład obiektu z opóźnieniami

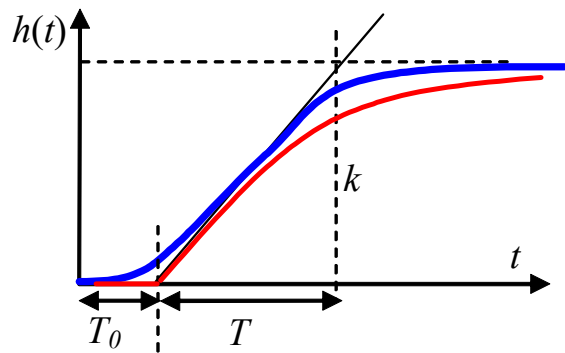


$$\begin{cases} C_{vw} \dot{T}_{zew} = K_{cg} (T_{gp} - T_{zew}) - K_{cw} (T_{zew} - T_{zew}) + q_t \\ C_{vg} \dot{T}_{gp} = c_{pw} f_{mg} (T_{gz} - T_{gp}) - K_{cg} (T_{gp} - T_{zew}) \\ C_{vk} \dot{T}_{kz} = q_k - c_{pw} f_{mk} (T_{kz} - T_{kp}) \end{cases}$$

oraz  $f_{mk} = f_{mg}$ ,  $T_{gz}(t) = T_{kz}(t - T_o)$ ,  $T_{kp}(t) = T_{gp}(t - T_o)$

### Opóźnienia transportowe opisujące zjawiska

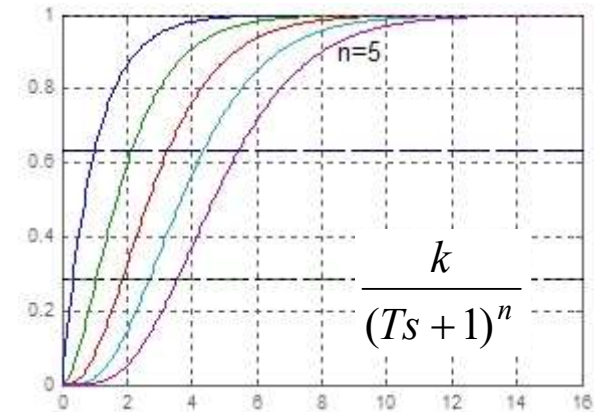
Opóźnienia transportowe wynikające z identyfikacji, np.:



$$\frac{k}{Ts + 1} e^{-sT_0}$$

$$e^{-sT_0} \approx \frac{1 - sT_0/2}{1 + sT_0/2}$$

aproxymacja Padé





# Utrudnienia – opóźnienie transportowe (problemy)

Problem dla dużych opóźnień transportowych

$$\frac{k}{Ts+1} e^{-sT_o}$$

$$k_r = T_o / T$$

$$T_o < \frac{T}{20}$$

$$\frac{T}{20} < T_o < \frac{T}{4}$$

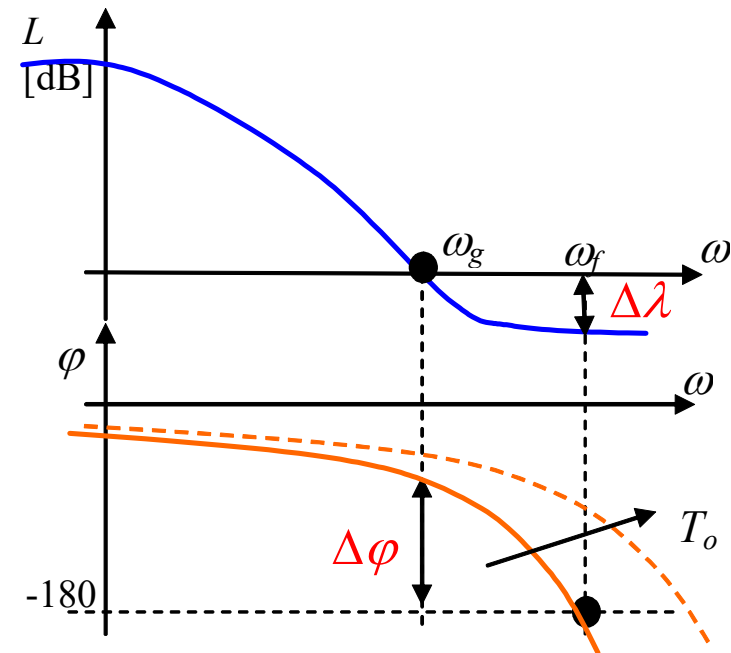
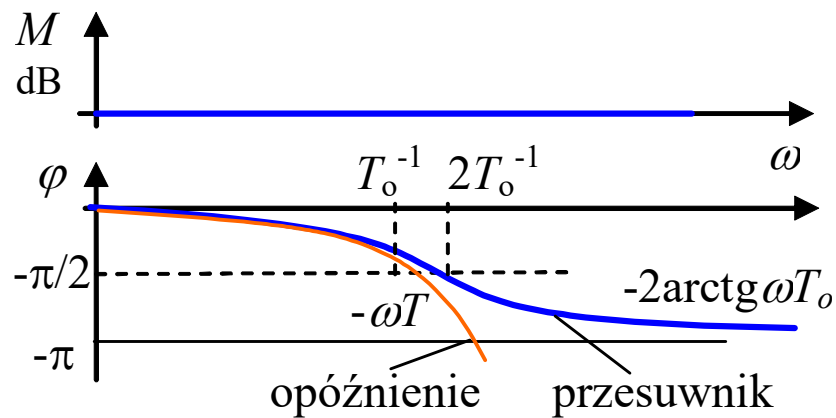
$$T_o > \frac{T}{4}$$



regulacja: łatwa

dość trudna

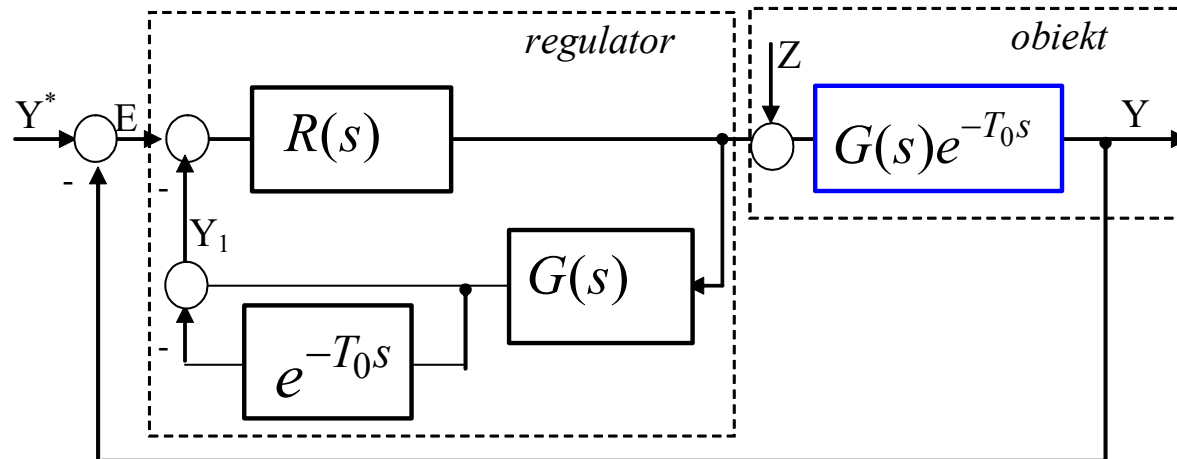
trudna



# Utrudnienia – opóźnienie transportowe (rozwiązania)

**Układy o charakterze predykcyjnym\*** – przewidywanie wartości sygnału na podstawie wyznaczonego modelu

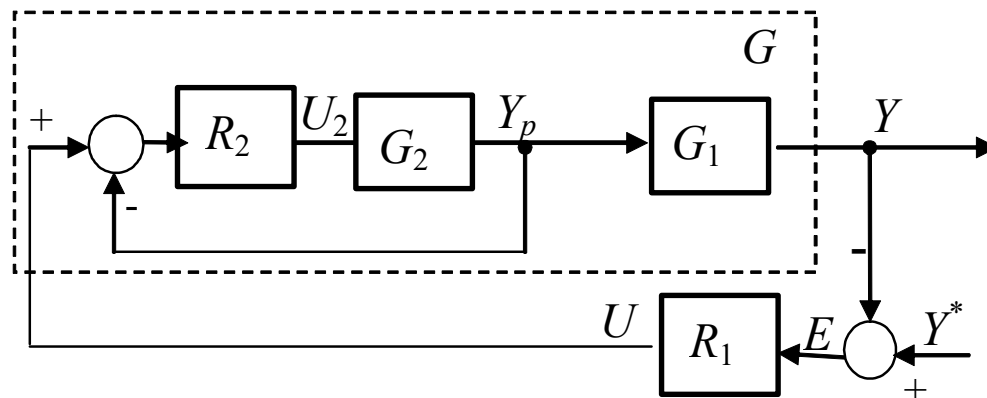
## Układ z predyktorem Smitha



Nastawy  $R$   
jak dla obiektu bez opóźnienia

(\* nie mylić z MPC - Model Predictive Control)

## Układ kaskadowy – układ z pomocniczą wielkością procesową



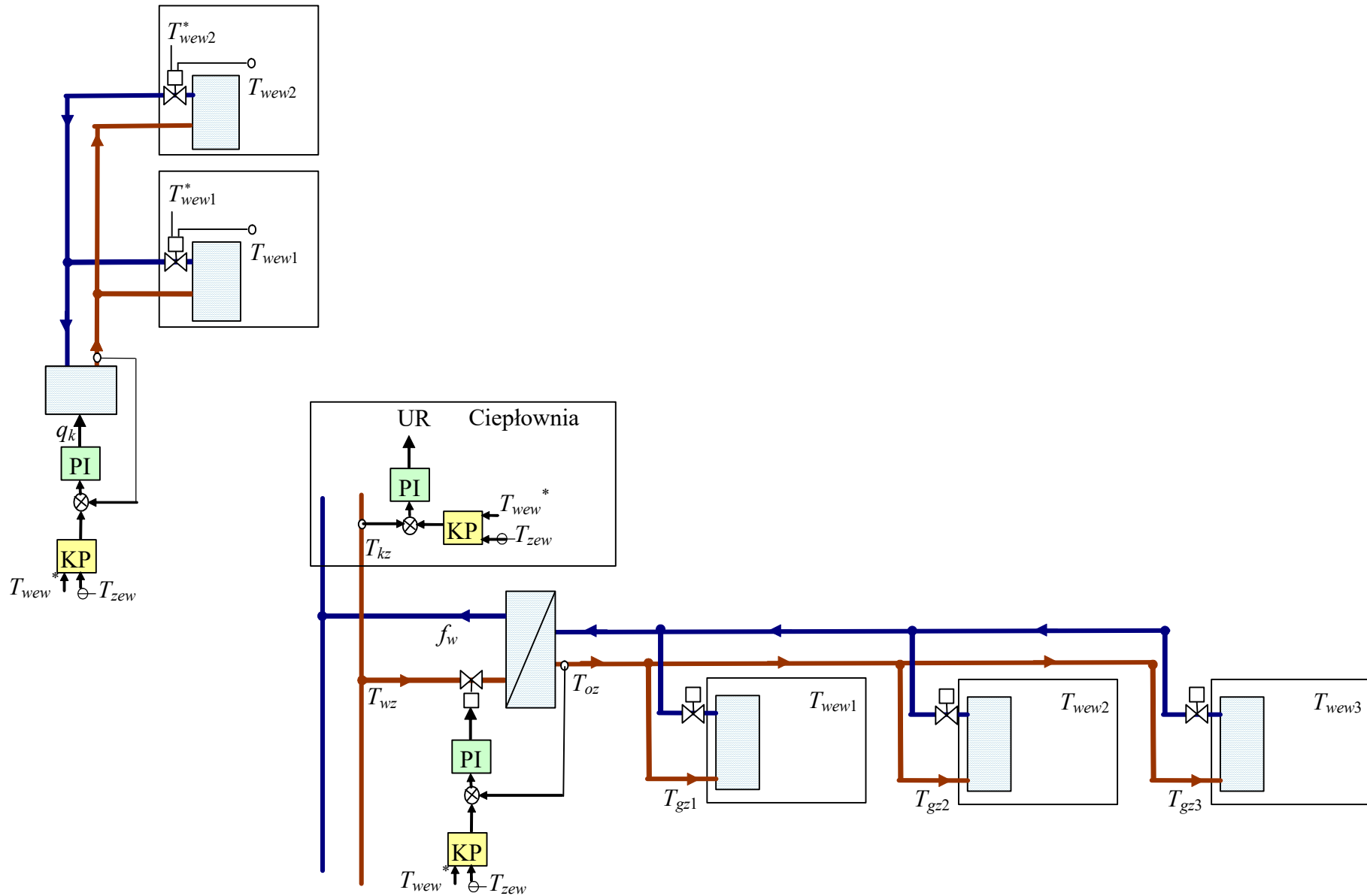
$R_2 = P, R_1 = PI$   
Nastawy  $R_2$  dla obiektu  $G_2$ .  
Nastawy  $R_1$  dla obiektu skorygowanego  $G$   
(obiekt skorygowany  $G \approx G_1$ )

$$Y(s) = G(s)U(s) = G_1(s) \frac{R_2(s)G_2(s)}{1 + R_2(s)G_2(s)} U(s)$$

Dla pasma, w którym  $|R_2(j\omega)G_2(j\omega)| \gg 1$  jest  $Y(s) \approx G_1(s)U(s)$   
(neutralizacja własności dynamicznych części obiektu)

# Utrudnienia – układy wieloobwodowe (przykład)

Przykład obiektu z wieloma obwodami regulacji



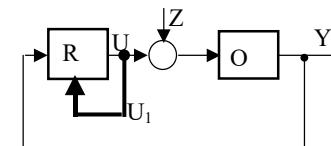
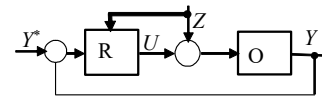
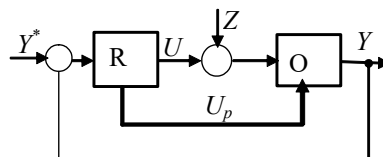
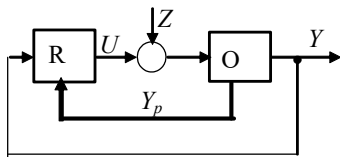
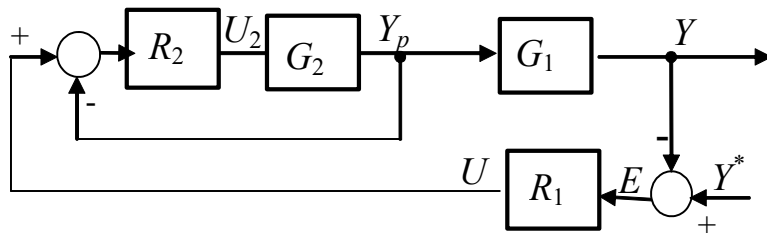
# Utrudnienia – układy wieloobwodowe (problemy)

Układy kaskadowe:

- wieloobwodowe - kilka pętli regulacji
  - w każdej pętli regulator
- określone struktury
  - można wyróżnić wewnętrzną i zewnętrzną pętlę regulacji
  - jeden cel regulacji (PV)
- klasyczne metody projektowania
  - nastawy PID wyznaczone w odpowiedniej kolejności

Regulacja złożona (wieloparametrowa)  
– wiele obwodów regulacji

- struktura zależna od obiektu
  - struktura hierarchiczna
    - jeden główny cel i cele pomocnicze (kilka PV)
  - sterowanie w przestrzeni stanów
    - wiele równorzędnych celów realizowanych jednocześnie



# Utrudnienia – układy wieloobwodowe (rozwiązania)

## Projektowanie złożonych systemów sterowania

- podejście „Bottom-Up”
  - podział systemy na oddzielne części
  - zalety: projektowanie i strojenie pętla po pętli
  - wady: problemy przy interakcji pętli
- podejście „Top-Down”
  - problem optymalizacyjny – analiza całego obiektu
  - techniki: optymalizacja, sterowanie w przestrzeni stanów

Regulacja centralna i lokalna

Złożone systemy sterowania zawierają zazwyczaj:

- nieliniowości
- opóźnienia transportowe
- wiele obwodów regulacji

## Utrudnienia – trudne przypadki regulacji

- 1) Nieliniowości
- 2) Opóźnienia transportowe
- 3) Wiele obwodów regulacji

Inne:

- zmienne lub niedokładnie mierzone parametry
  - przykłady: napędy, roboty, ...
  - rozwiązania: układy odporne (robust)
- niestabilny obiekt
  - przykłady: wahadło odwrócone, streetboard, ...
  - stabilizacja za pomocą sprzężenia zwrotnego
  - problemy: identyfikacja modelu, kryterium stabilności
- złożone procesy z ograniczeniami
  - rozwiązania: MPC (Model Predictive Control)