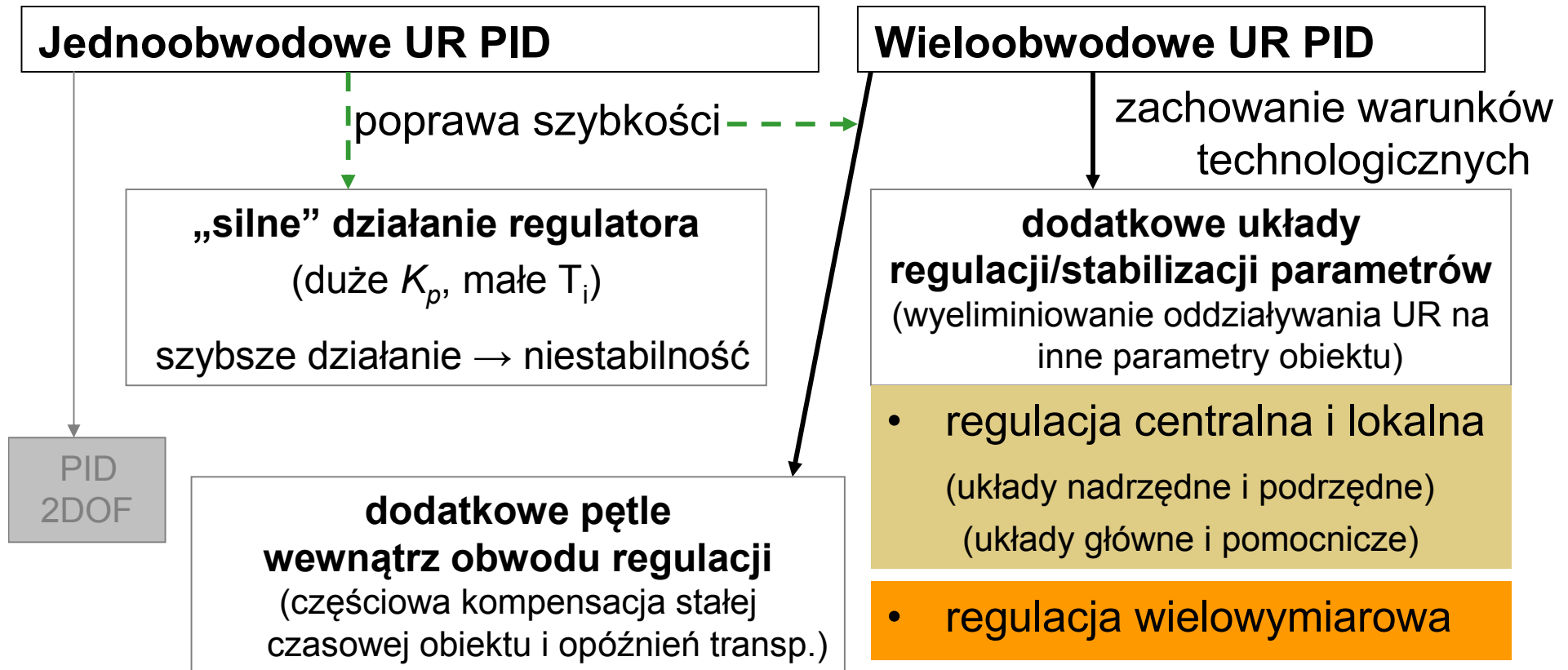


Projektowanie układów wieloobwodowych (typu „Bottom-Up”)



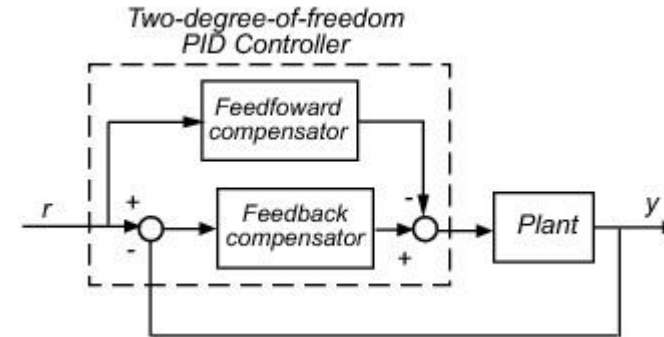
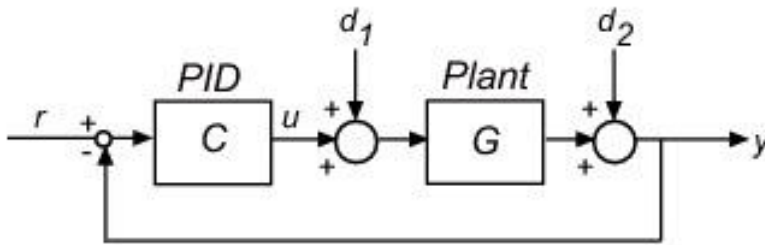
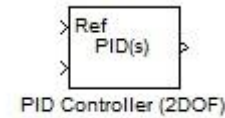
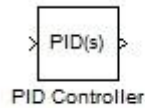
Układy z wielkością pomocniczą:

- regulowaną – **regulacja kaskadowa**
- sterującą
- pomiarem zakłóceń
- wewnątrz regulatora

Regulaor PID z dwoma stopniami swobody (PID 2DOF)

Matlab

1lub 2 regulatory (kompensatory)



Two-degree-of-freedom
PID Controller
(PID Controller 2DOF)

Feedforward compensator - PD,
Feedback compensator - PID

Własności:

- płynne śledzenie wartości zadanej
- dobre tłumienie zakłóceń

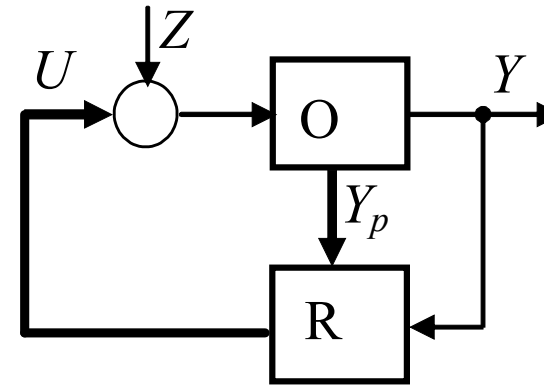
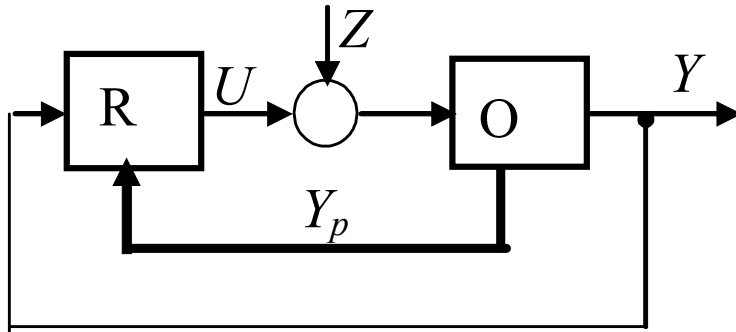
Projektowanie:

- 1) Feedforward – optymalizacja reakcji na zmianę w.zadana
- 2) Feedback – odporność i tłumienie zakłóceń

Układ z pomocniczą wielkością regulowaną (regulacja kaskadowa)

Idea:

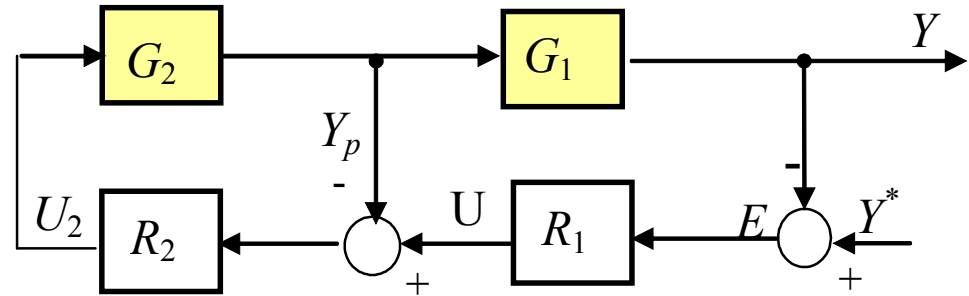
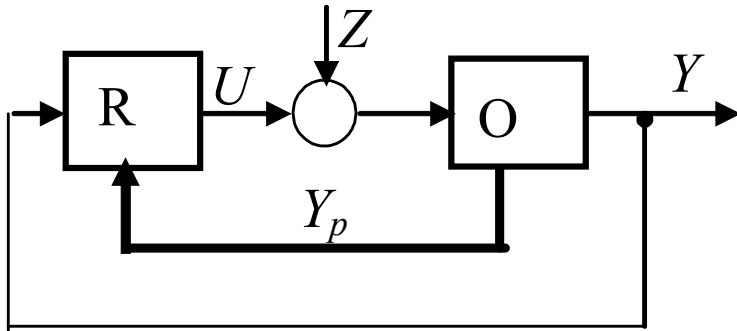
- pomiar pomocniczej wielkości regulowanej Y_p pobieranej w punkcie o małym opóźnieniu
- wprowadzenie pomocniczego obwodu regulacji, który reaguje szybciej od obwodu głównego



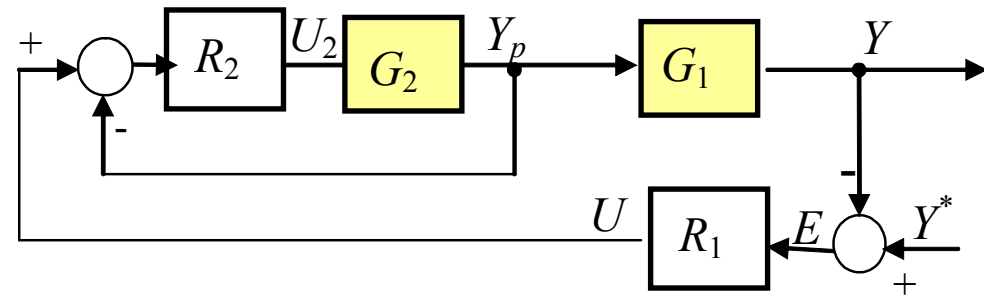
Zastosowanie:

- przyspieszenie regulacji
 - częściowa kompensacja stałej czasowej obiektu i opóźnień transp
 - poprawa stabilność regulacji w stosunku do pojedynczej pętli
- kompensacja wpływu zakłóceń
- linearyzacja charakterystyki statycznej

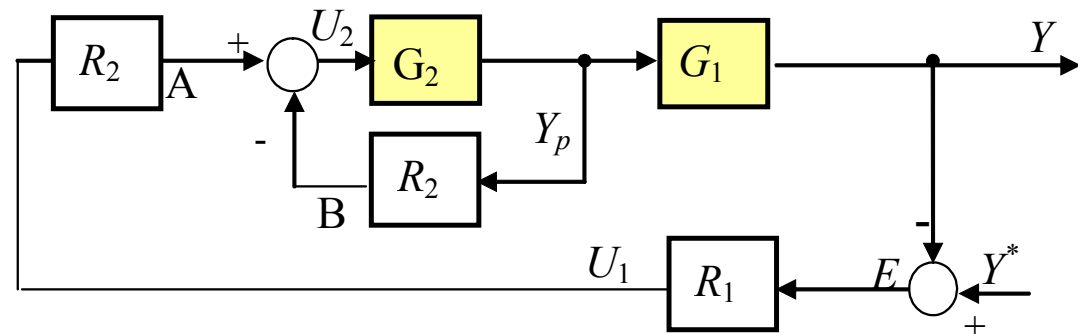
Układ z pomocniczą wielkością regulowaną (regulacja kaskadowa)



Sprzężenie korekcyjne R_2



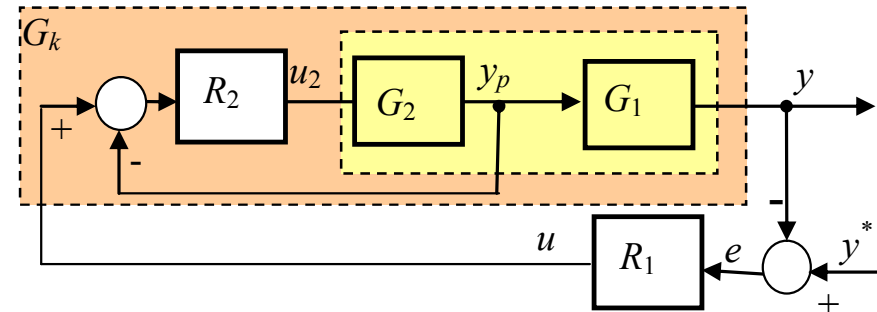
Zał.: liniowe R_2



1) Neutralizacja własności dynamicznych części obiektu G_2 (korekcja)

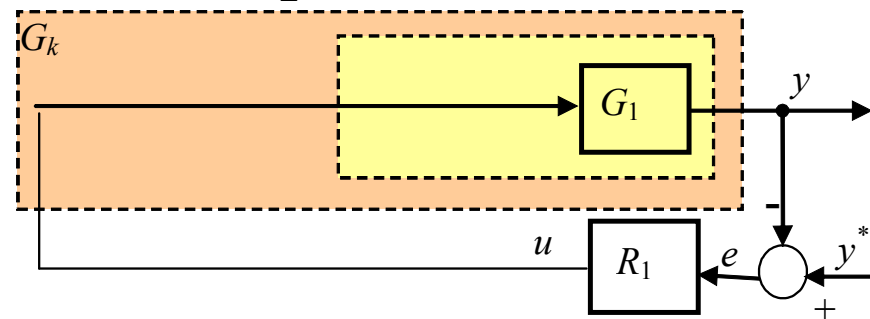
Zał.: Liniowe R_2 i G_2

$$\frac{Y(s)}{U_1} = G_1(s) \frac{R_2(s)G_2(s)}{1 + R_2(s)G_2(s)}$$



- w paśmie częstotliwości, w którym $|R_2(j\omega)G_2(j\omega)| \gg 1$

jest $\frac{Y(s)}{U_1} \approx G_1(s)$ (własności części G_2 są „zneutralizowane”)



Dobór regulatorów i nastaw:

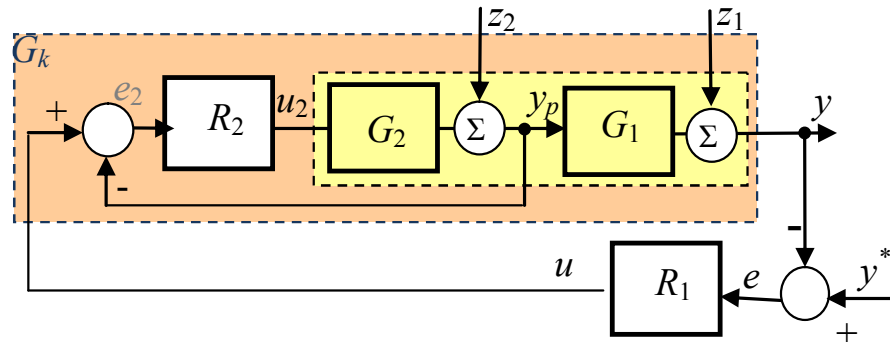
- regulator pomocniczy R_2
 - wystarczy P (niezerowy uchyb nie ma znaczenia),
 - możliwie duże wzmocnienie (aby $|R_2G_2| \gg 1$)
- regulator główny R_1 – zwykle PI (analogicznie jak w układach jednoobwodowych).

Układ z pomocniczą wielkością regulowaną (regulacja kaskadowa)

2) Kompensacja zakłóceń

Zał.: dwa rodzaje zakłóceń

- Z_2 – przed miejscem pomiaru (wpływają na Y_p)
- Z_1 – wpływają na Y_p dopiero po przejściu całego obwodu

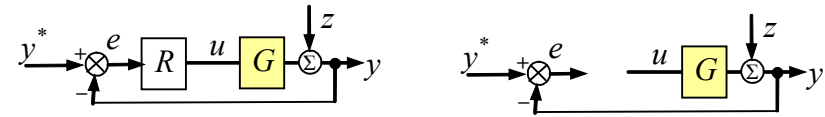


$$G_k(s) = \frac{Y(s)}{U_1} = G_1(s) \frac{R_2(s)G_2(s)}{1 + R_2(s)G_2(s)}$$

Dla Z_1 jest: $q_1(j\omega) = \frac{1}{1 + R_1(j\omega)G_k(j\omega)} = \frac{1}{1 + R_1(j\omega)G_1(j\omega) \frac{R_2(j\omega)G_2(j\omega)}{1 + R_2(j\omega)G_2(j\omega)}}$

Dla Z_2 jest: $q_2(j\omega) = q_1(j\omega) \frac{1}{1 + R_2(j\omega)G_2(j\omega)}$

zakłócenia Z_2 są kompensowane $(1 + R_2G_2)$ razy silniej niż Z_1



$$e = \frac{1}{1 + RG} y^* - \frac{1}{1 + RG} z$$

$$e = y^* - z$$

$$e = e_{y^*} - e_z$$

Badamy wskaźnik jakości q

(ile razy zmniejsza się uchyb od zakłóceń po wprowadzeniu regulatora)

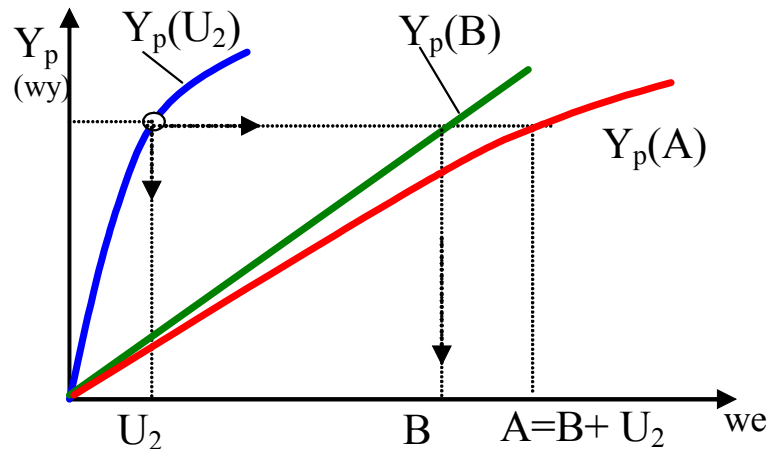
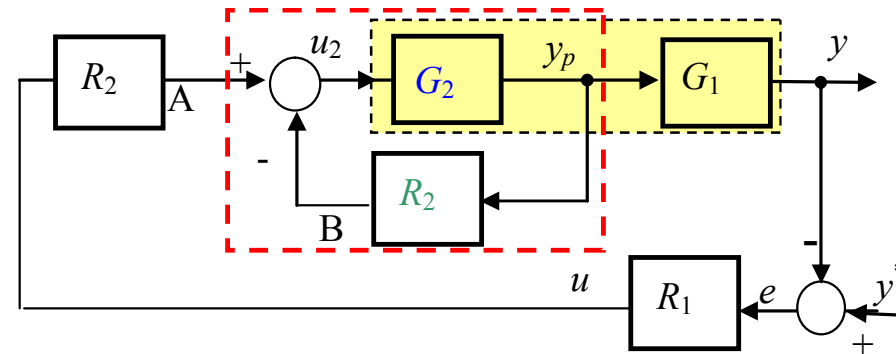
$$\frac{e_{z_k,R}(j\omega)}{e_{z_k,B}(j\omega)} = \frac{z(j\omega)}{1 + R(j\omega)G(j\omega)} \frac{1}{z(j\omega)} = \frac{1}{1 + R(j\omega)G(j\omega)}$$

3) Linearyzacja charakterystyki statycznej obiektu

Zał.:

G_2 nieliniowe

$R_2 = K_{p2}$ (wystarczy $K_{p2} > 0$)



ch-ki pierwotne:

$Y_p(U_2)$ – ch-ka członu G_2

$Y_p(B)$ – odwrócona ch-ka regulatora $R_2 = K_{p2}$

$A = B + U_2$ – węzeł sumacyjny $U_2 = A - B$

ch-ka wypadkowa (zlinearyzowana)

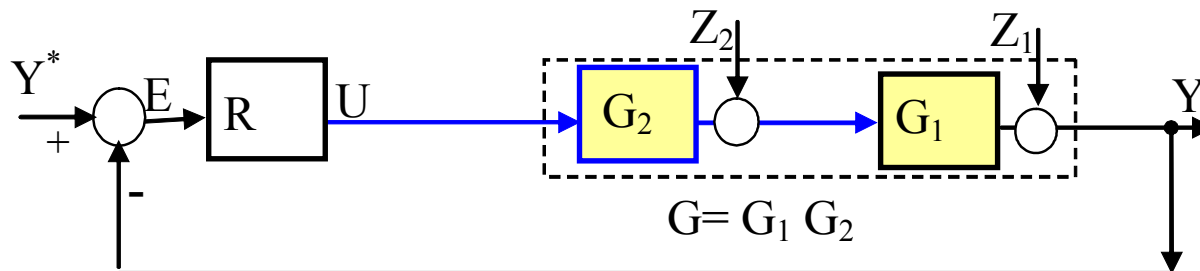
$Y_p(A) = Y_p(B + U_2)$

Sposób wyznaczenia ch-ki wypadkowej:

- 1) dla każdego Y_p odczytać U_2
- 2) dla każdego Y_p odczytać B
- 3) dla każdego Y_p rysujemy $A = B + U_2$

Układ z pomocniczą wielkością regulowaną (regulacja kaskadowa)

Matlab: Dobór nastaw wspomagany przez pidtune



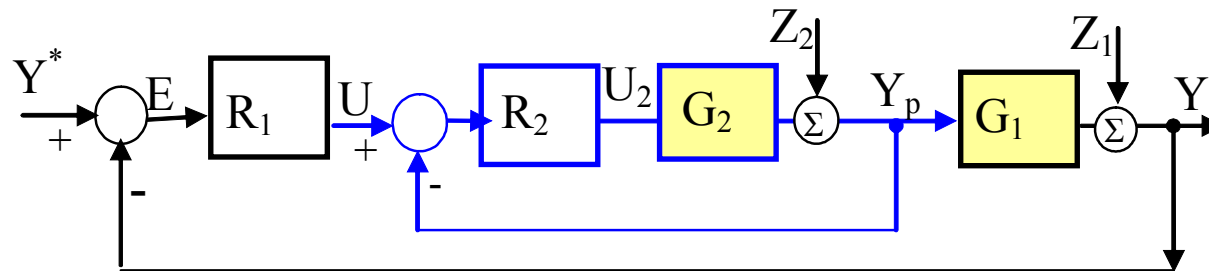
Pojedyncza pętla regulacji

G1 = ...

G2 = ...

opcje =

R=pidtune(G1*G2, 'PI', opcje)



Regulacja kaskadowa

G1 = ...

G2 = ...

opcje1 =

R2=pidtune(G2, 'P', opcje1)

obiektK = feedback(G2*R2,1)

opcje =

R1=pidtune(obiektK*G1, 'PI', opcje)

Porównanie własności pojedynczej pętli (sys1*) i kaskady (sys2*):

Zmiana w.zadanej:

sys1y = feedback(G1*G2*R,1)

sys2y = feedback(R1*obiektK*G1,1)

step(sys1y,'r', sys2y,'b')

Reakcja na zakłócenie Z₁:

sys1z1 = feedback(G1,G2*R)

sys2z1 = G1/(1+G2*R2+G1*G2*R1*R2)

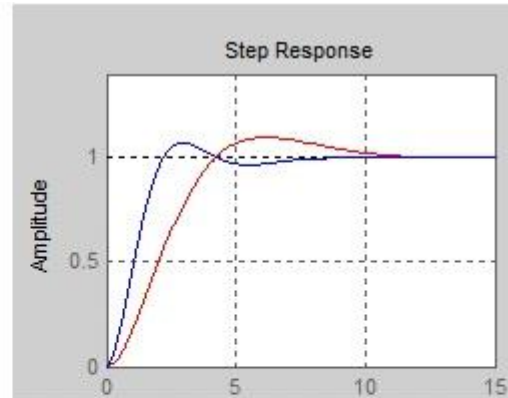
step(sys1z1,'r', sys2z2,'b')

Układ z pomocniczą wielkością regulowaną (regulacja kaskadowa)

```

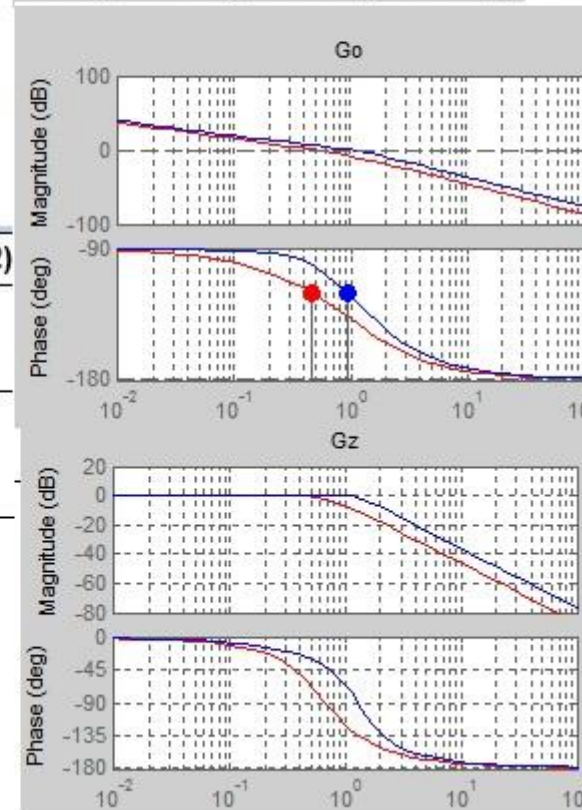
3 - s=tf('s');
4 - G2=1/(4*s+1); G1=1/(1*s+1);
5 - [R info]=pidtune(G1*G2, 'PI')
6 - sysR = feedback(G1*G2*R,1)
7 - stepinfo(sysR)
8 - %[Gm,Pm,Wcg,Wcp] =margin(G1*G2*R)
9 -
10 [R2 info2]=pidtune(G2, 'P');
11 obiektK = feedback(G2*R2,1);
12 [R1 info1]=pidtune(obiektK*G1, 'PI')
13 sysR1R2 = feedback(R1*obiektK*G1,1)
14 stepinfo(sysR1R2)
15 %[Gm1,Pm1,Wcg1,Wcp1]=margin(R1*obiektK*G1)
16 - step(sysR,'r', sysR1R2,'b')
17 - figure, bode(sysR,'r', sysR1R2,'b'), title('Gz')
18 - figure, bode(G1*G2*R,'r', R1*obiektK*G1,'b'),
19 - title('Go')
20 -

```



| | reg.R | reg.R1 (+ R2) |
|----------|---|---|
| Kp+Ki--- | with Kp = 1.9302, Ki = 0.59255 | Kp = 2.8792, Ki = 1.3266 |
| info = | Stable: 1 CrossoverFrequency: 0.4625 PhaseMargin: 60.0000 | 1 0.9300 60.0000 |
| stepinfo | RiseTime: 2.8383 SettlingTime: 10.1192 SettlingMin: 0.9161 SettlingMax: 1.0967 Overshoot: 9.6658 Undershoot: 0 Peak: 1.0967 PeakTime: 6.1226 | 1.4862 6.7236 0.9141 1.0709 7.0863 0 1.0709 3.0119 |

zbadać wpływ przyspieszenia R na zapas fazy



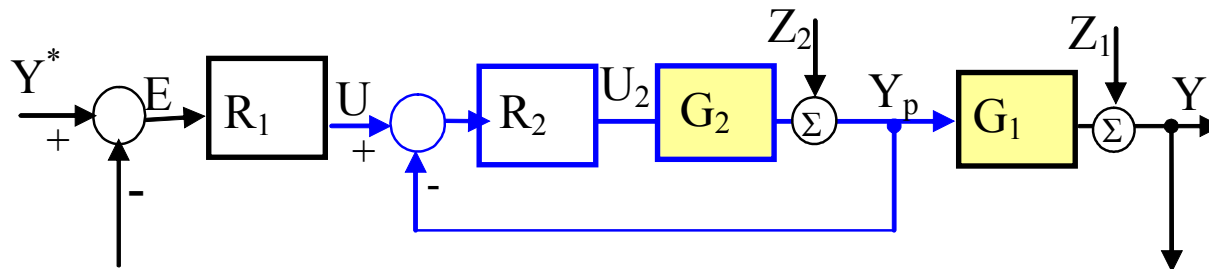
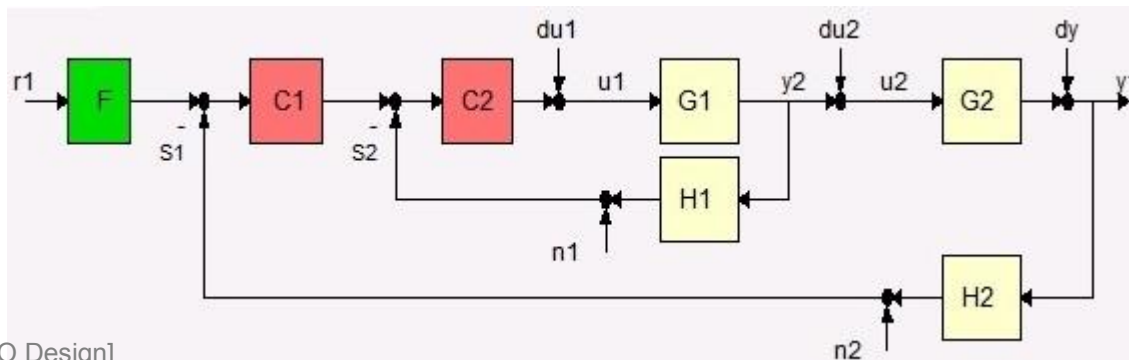
Układ z pomocniczą wielkością regulowaną (regulacja kaskadowa)

Matlab: SISO Design Tool dla LTI (obiekt LTI)

Wywołanie: `sisotool(obiekt_lti, regulator)`
`sisotool(obiekt_lti)`
`sisotool()`

obiekt_lti = model obiektu (bez regulatora)
regulator = model regulatora

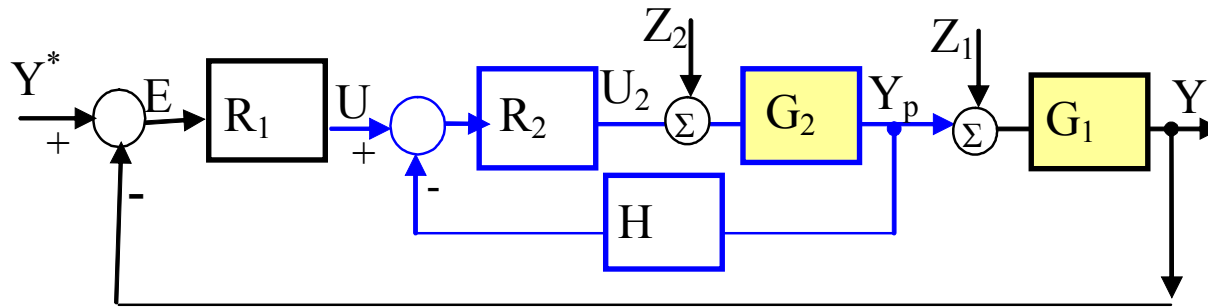
Struktura:



[dokumentacja Matlaba: Z_1 , Z_2 – zakłócenia wyjściowe (dy)]

Układ z pomocniczą wielkością regulowaną (regulacja kaskadowa)

Wyznaczanie parametrów regulatorów układu kaskadowego metodami reduktów i przybliżenia Padégo



$$\begin{cases} e = y^* - y \\ u = eR_1 \\ e_2 = u - y_p \\ u_2 = e_2R_2 \\ y_p = u_2G_2 + z_2 \\ y = y_pG_1 + z_1 \end{cases}$$

$$y = \frac{R_1R_2G_1G_2}{M} y^* + \frac{G_1G_2}{M} z_2 + G_1 \frac{1 + HR_2G_2}{M} z_1$$

$$M = 1 + HR_2G_2 + R_1R_2G_1G_2$$

Założenia:

$$G_1 = \frac{k_1}{T_1s+1} e^{+sT_0} \approx \frac{k_1}{T_1s+1} \frac{b_1s+b_0}{a_2s+a_0} = \frac{L_1}{M_1} \quad G_z = \frac{y}{y^*} = \frac{R_1R_2G_1G_2}{M} = \frac{L_1L_2L_{R1}L_{R2}}{M_1M_2M_{R1}M_{R2} + hL_{R1}L_{R2}M_1M_{R1} + L_1L_2L_{R1}L_{R2}}$$

$$G_2 = \frac{k_2}{T_2s+1} = \frac{L_2}{M_2}$$

$$R_1 = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) = \frac{L_{R1}}{M_{R1}}$$

$$R_2 = K_{p2} = \frac{L_{R2}}{M_{R2}}$$

$$H = h$$

$$z_1 = z_2 = 0$$

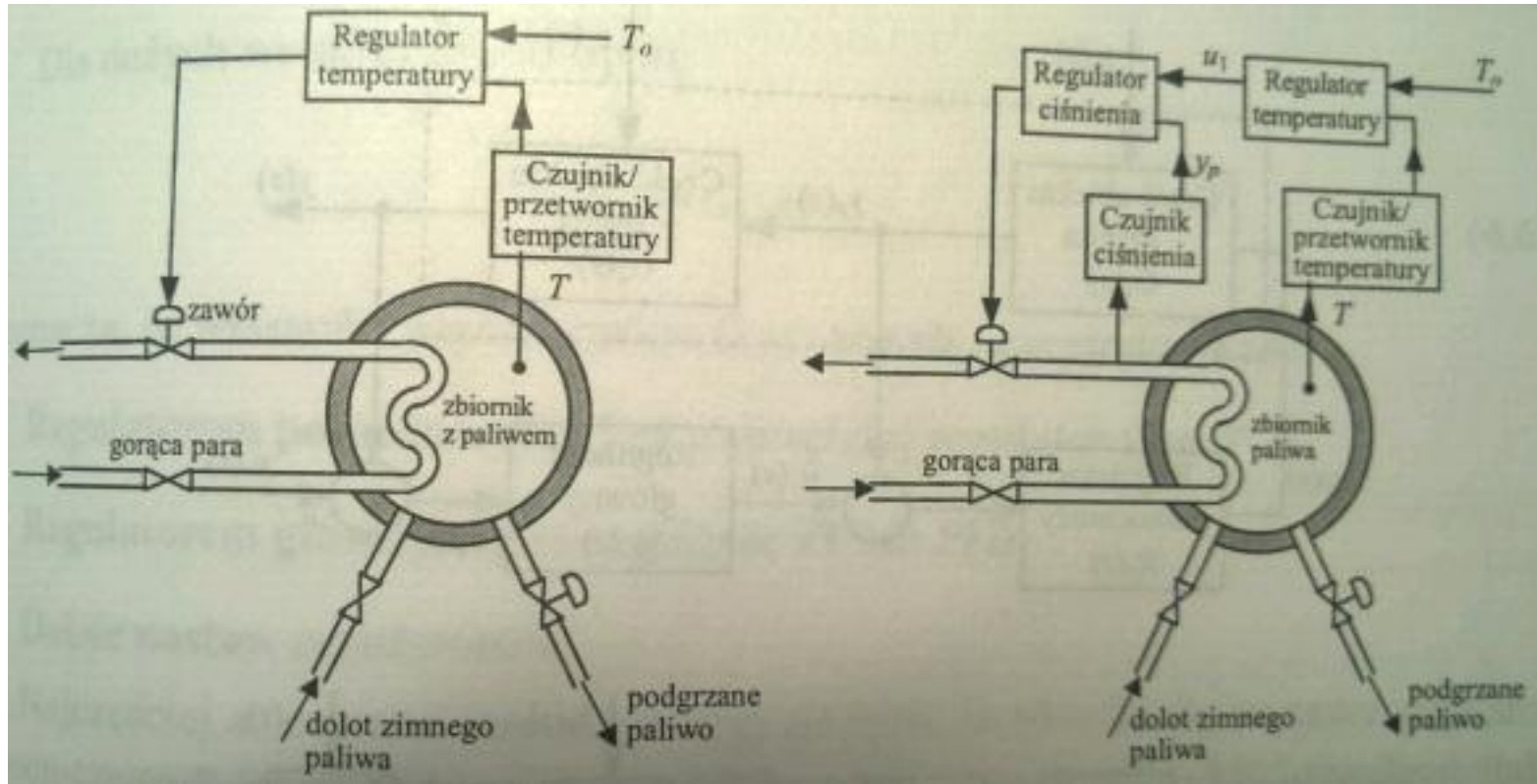
$$G_z = \frac{c_3s^3 + c_2s^2 + c_1s + c_0}{d_4s^4 + d_3s^3 + d_2s^2 + d_1s + d_0}$$

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

Uwaga: 1) Z_2, Z_1 – zakłócenia wejściowe (tak jak w Matlabie du_2, du_1), 2) u Halawy inne oznaczenia iż na rys. powyżej

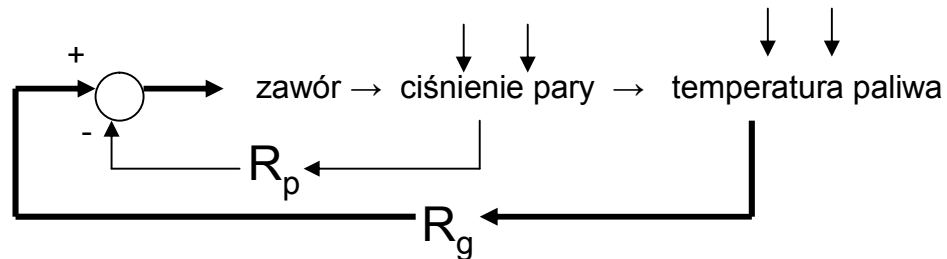
Układ z pomocniczą wielkością regulowaną (regulacja kaskadowa)

Przykład – układ podgrzewania paliwa



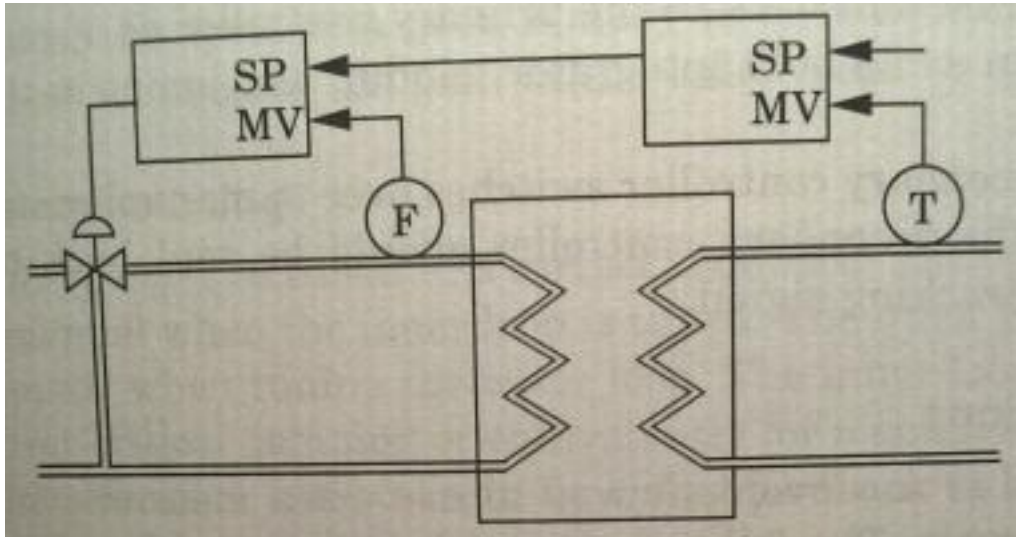
-zmiany ciśnienia pary wpływają na temperaturę paliwa
-to powoduje reakcję regulatora temperatury

- zmiany ciśnienia pary są widoczne „od razu” i koryguje przez regulator (stabilizator) ciśnienia



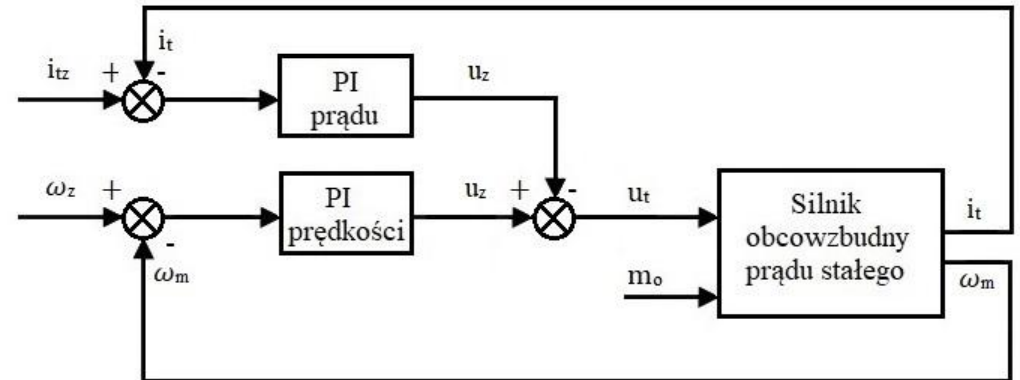
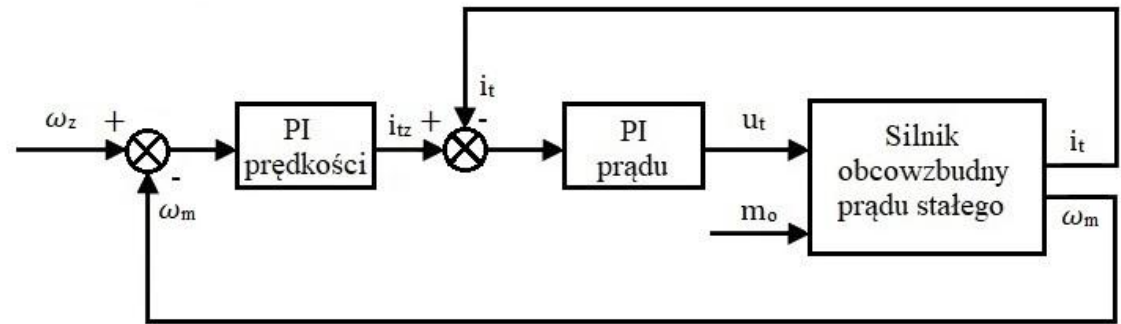
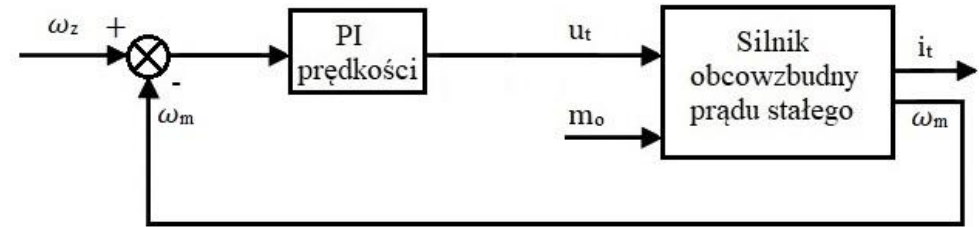
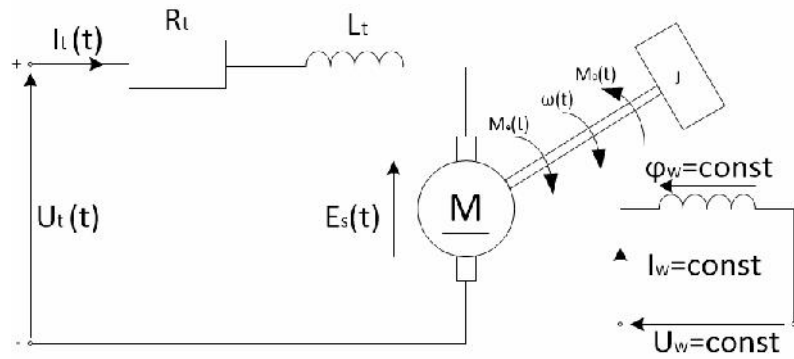
Układ z pomocniczą wielkością regulowaną (regulacja kaskadowa)

Przykład – wymiennik ciepła z regulacją temperatury

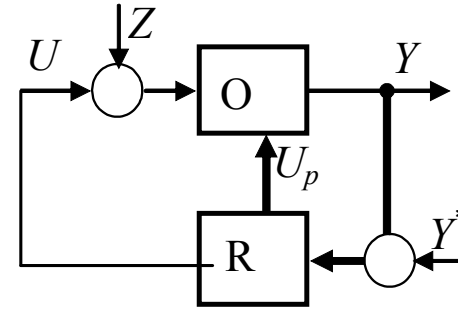
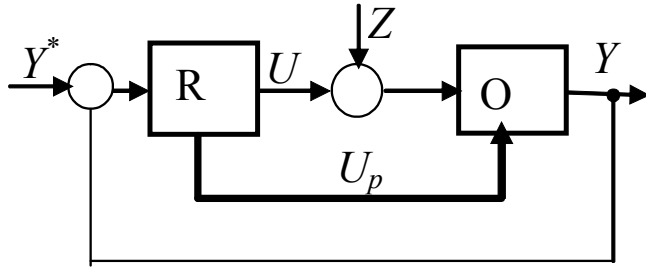


Układ z pomocniczą wielkością regulowaną (regulacja kaskadowa)

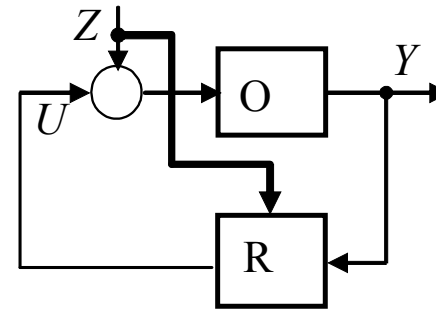
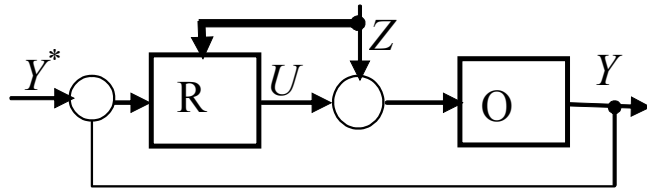
Przykład – silnik DC



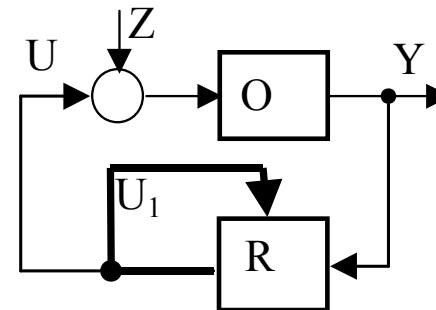
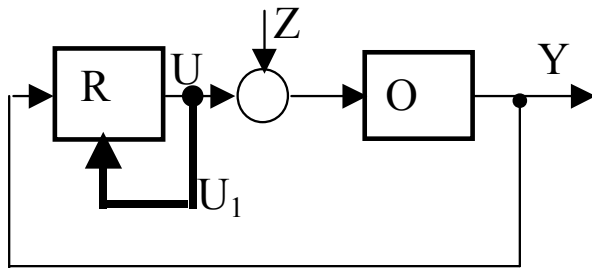
Układ z pomocniczą wielkością sterującą



Układ z pomocniczym pomiarem zakłóceń



Układ z pomocniczym sprzężeniem wewnątrz regulatora (z korekcją)



Wielowymiarowe układy regulacji

Regulacja kilku współzależnych wielkości,

np.:

- regulacja prędkości, momentu obrotowego i mocy silnika
- regulacja zespołu generator napięcia z turbiną gazową (prędkość obrotowa turbin, napięcie na zaciskach generatora)
- regulacja częstotliwości, napięcia, mocy czynnej i bienej w systemie energetycznym

Sprzężenia skrośne pomiędzy układami regulacji,

np.:

- silnik – zależność prędkości obrotowej i momentu obrotowego
 - zmiana zadanej prędkości obrotowej wpływa też na moment obrotowy
 - zmiana zadanego momentu obrotowego wpływa na zmianę prędkości obrotowej
- generator-turbina – zależność częstotliwości i napięcia

Złożone układy regulacji

Omawiane układy wieloobwodowe

- Kilka (np. 2) pętli regulacji – w każdej pętli regulator
- Określone struktury - można wyróżnić wewnętrzną i zewnętrzną pętlę regulacji
- Zastosowanie klasycznych metod projektowania PID w odpowiedniej kolejności

W odróżnieniu od:

- regulacji złożonej (wieloparametrowej)
 - jeden główny cel (wartość procesowa)
 - kilka współzależnych wartości procesowych
- sterowania w przestrzeni stanów – jedno główne sterowanie

Projektowanie złożonych systemów sterowania

- podjęcie „Bottom-Up”
 - podział systemy na oddzielne części
 - zasady sterowania: feedback, feedforward, MFC, cascade control
repetitive control, mid-range control, split-range control, ratio control, selector control
 - zalety: projektowanie i strojenie pętla po pętli
 - wady: problemy przy interakcji pętli
- podjęcie „Top-Down”
 - punktem wyjścia jest często problem optymalizacyjny
 - techniki: optymalizacja, state feedback, observers, predictive control, linearyzacja
 - przy działaniu jednocześnie na wielu wejściach i wyjściach

Interaakcja pętli - [PID Controller, Astrom/7.8]

Inwariantność [Brzózka/4.8.8]

Ciepłownie – układy hydrauliczne

