



Wykład 8

Regulatory elektroniczne

Wprowadzenie

Określenia **sterowanie i regulacja** w potocznym użyciu są zbliżone do siebie i często są stosowane wymiennie jako bliskoznaczne.

Podstawową cechą charakteryzującą układ sterowania jest obecność sprzężenia zwrotnego lub też jego brak. W przypadku występowania takiego sprzężenia mówi się o zamkniętym układzie sterowania, układzie regulacji lub o układzie regulacji automatycznej.

W układach sterowania bez sprzężenia zwrotnego – zwanych także układami otwartymi – często występuje konieczność ręcznego nastawiania wielkości zadającej, aby skorygować odchyłki wielkości wyjściowej, występujące wskutek zmiany parametrów układu (tzw. „sterowanie ręczne”).

Wprowadzenie (cd)

Układ sterowania zamknięty to wydzielony fizyczny obiekt, zawierający oprócz maszyny roboczej i układów wykonawczych, zestaw układów elektronicznych, przetwarzających sygnały zadające i pomiarowe tak, aby uzyskać poprawne działanie urządzenia.

Jednym z **najistotniejszych elementów układu sterowania jest regulator**, który umożliwia poprawną i bezpieczną pracę urządzenia w stanie ustalonym i w stanach przejściowych (dynamicznych).

Stosowanie w torze sterowania regulatora ma na celu uzyskanie nie tylko bezpiecznej (stabilnej) pracy układu, ale również odpowiedniej jakości nastawiania wielkości sterowanej i kompensacji zakłóceń.

Klasyfikacja układów sterowania i regulacji

Ze względu na rodzaj sygnału zadającego i sposób jego zmienności w czasie rozróżnia się:

Sterowanie stałowartościowe, w którym nastawiana w większych odstępach czasu wartość wielkości regulowanej powinna być stabilizowana oraz przy przestrajaniu wielkości zadającej uchyb przejściowy powinien zanikać dostatecznie szybko.

Sterowanie programowe, w którym o zmianach wielkości zadającej decyduje nadrzędny system sterowania, generujący funkcję (program) zmian stanu urządzenia.

Sterowanie nadążane – zwane też często śledzącym – przeznaczone do możliwie wiernego odtwarzania chwilowych wartości stale zmieniającego się sygnału, który odtwarza przypadkowo zmieniający się stan obiektu regulowanego.

Klasyfikacja układów sterowania i regulacji

Ze względu na stopień trudności wyboru układu sterowania i metody jego projektowania jest podział na **układy liniowe i układy nieliniowe**.

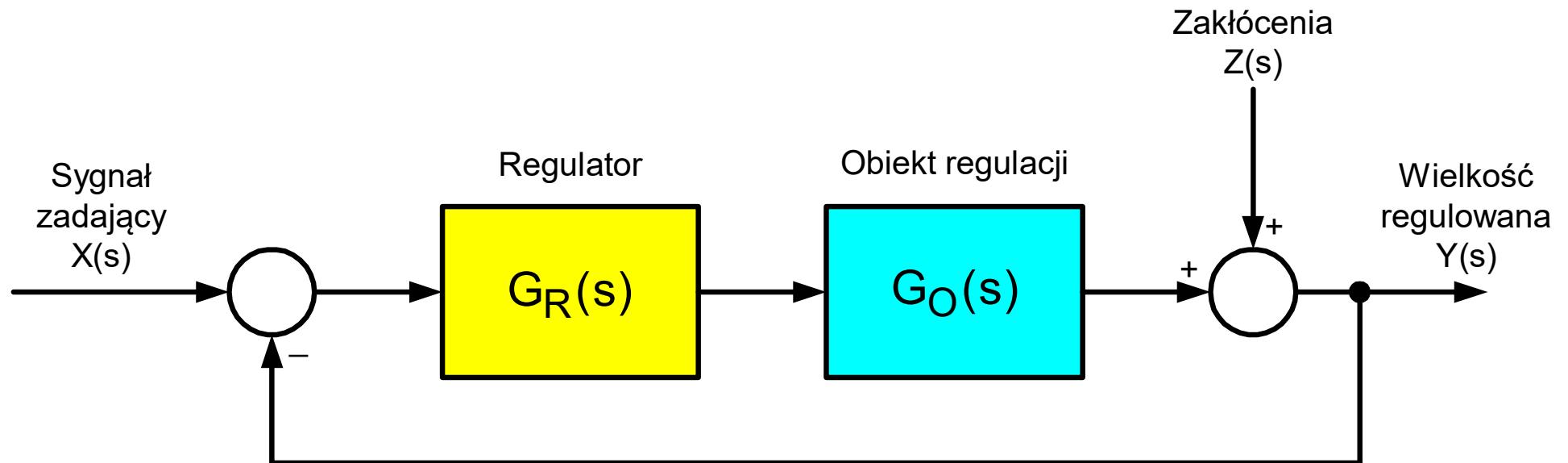
Ze względu na liczbę wielkości regulowanych najczęściej stosuje się **układy z jednym wyjściem**, jednak niekiedy konieczne jest regulowanie niezależne kilku wielkości – **układy wielowyjściowe**.

Szczególne znaczenie praktyczne ma podział na **sterownie ciągłe i sterownie dyskretne**.

Zastosowanie mikroprocesorów rozszerza znacznie możliwości realizacji cyfrowych układów sterowania w porównaniu z techniką budowania tych układów jako obwodów analogowych. Dzięki temu, że w tym przypadku struktura układu regulacji jest odwzorowana w algorytmie programu zapisanego w pamięci, z łatwością można ją zmienić w trakcie pracy (**układy ze zmienną strukturą**) lub dopasować nastawy do zmiennych parametrów obiektu i procesu sterowania (**układy adaptacyjne**).

Układ regulacji z jednym regulatorem

Zamknięty układ sterowania



Transmitancja widmowa

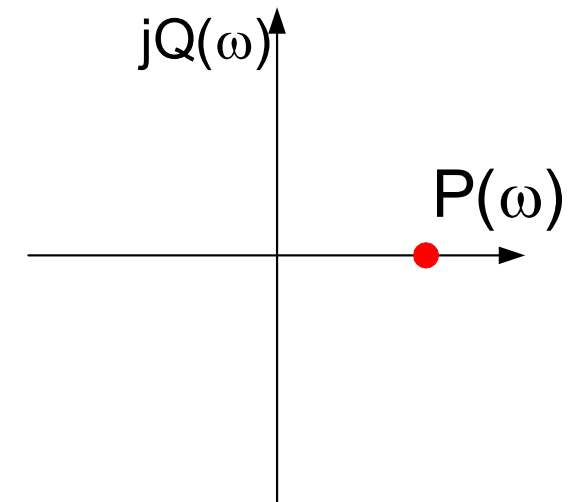
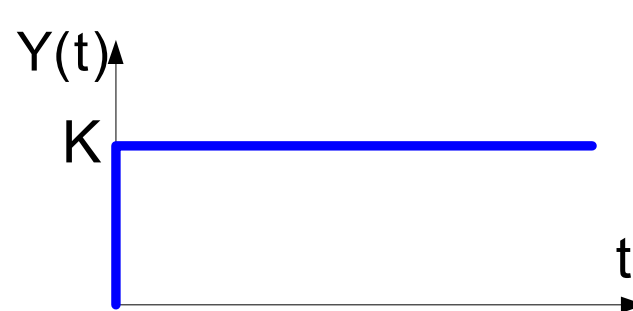
$$T(j\omega) = G(s)|_{s=j\omega}$$

Podstawowe człony układu regulacji

Transmitancje operatorowe oraz odpowiedź na skok jednostkowy i charakterystyki amplitudowo-fazowe

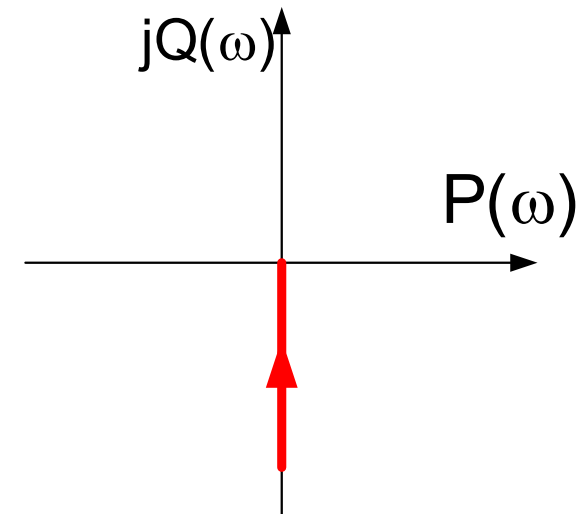
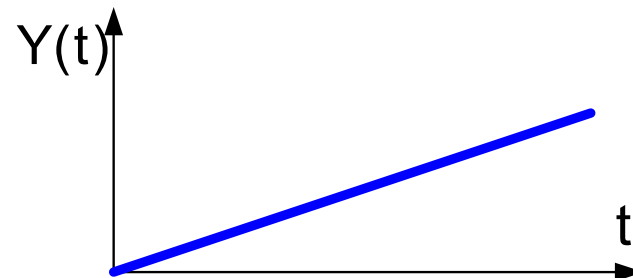
Człon proporcjonalny

$$G(s) = K$$



Człon całkujący

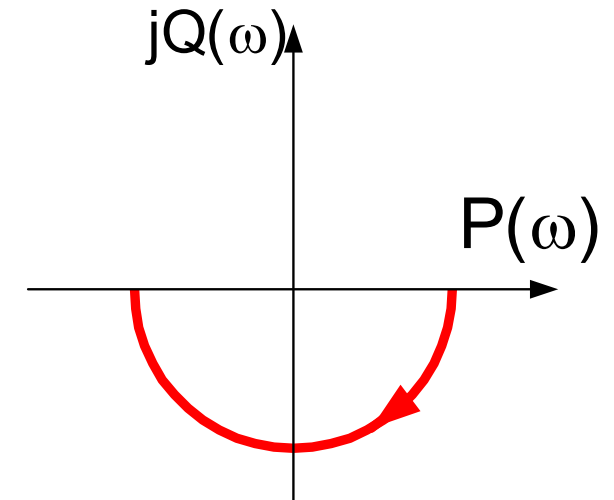
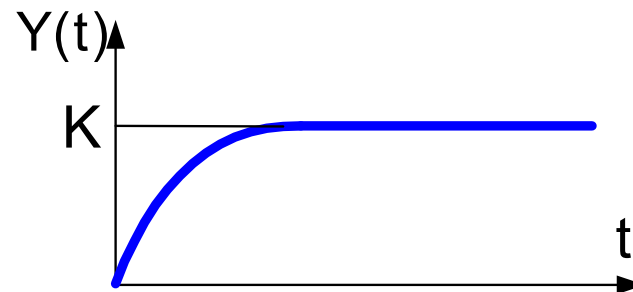
$$G(s) = \frac{K}{sT_i}$$



Podstawowe człony układu regulacji (cd)

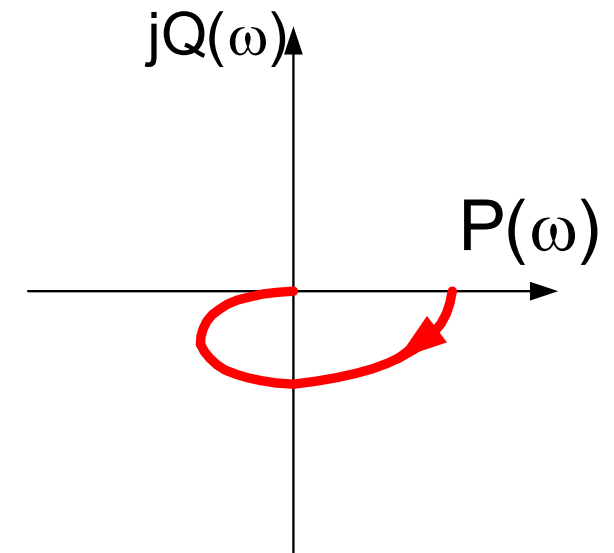
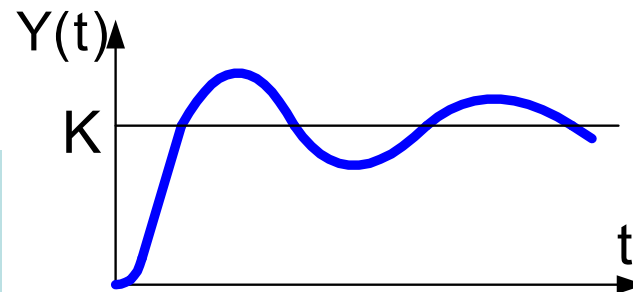
Człon inercyjny
I rzędu

$$G(s) = \frac{K}{1 + sT}$$



Człon inercyjny
II rzędu

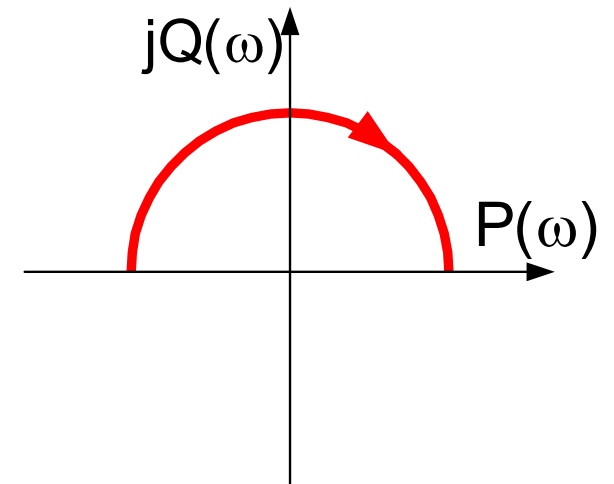
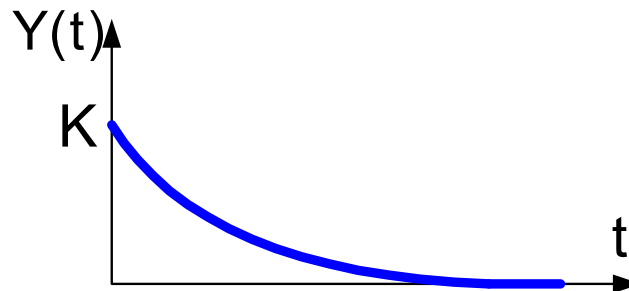
$$G(s) = \frac{K}{1 + sT_1 + (sT_2)^2}$$



Podstawowe człony układu regulacji (cd)

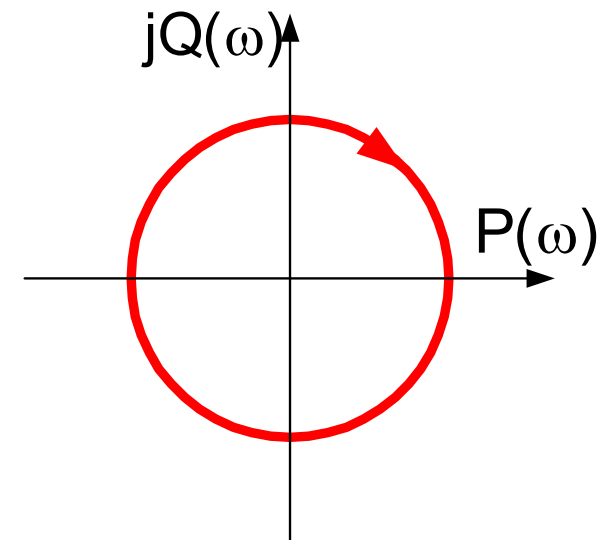
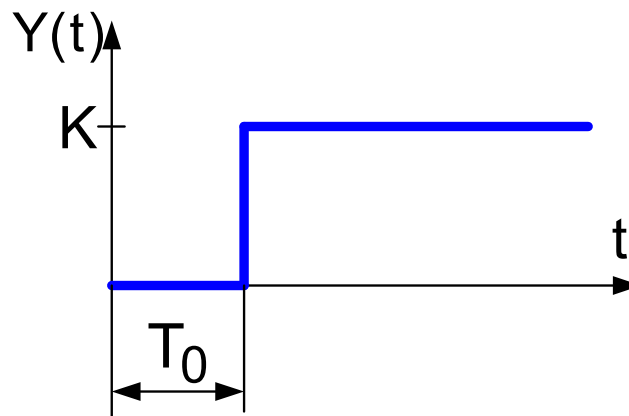
Człon różniczkujący
rzeczywisty

$$G(s) = \frac{K \cdot T_d \cdot s}{1 + sT_d}$$



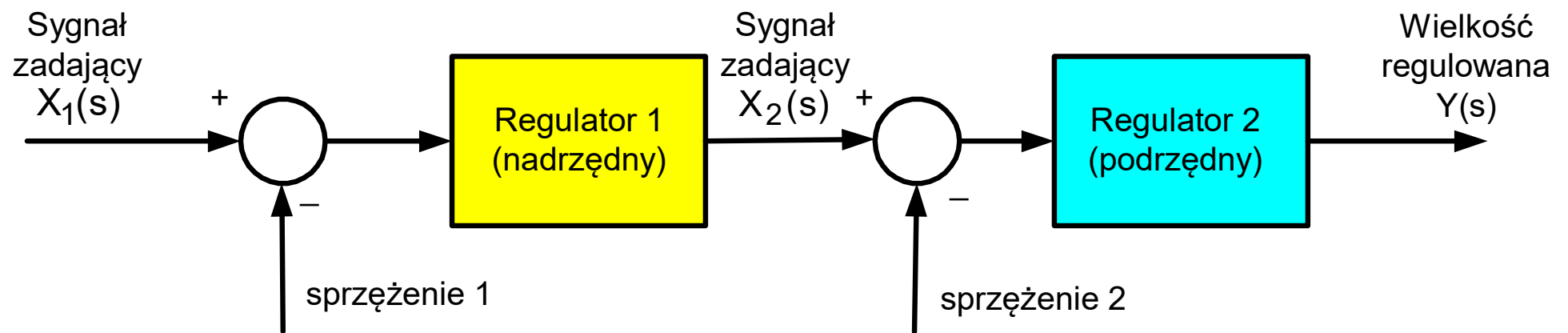
Człon opóźniający

$$G(s) = K \cdot e^{-sT_0}$$



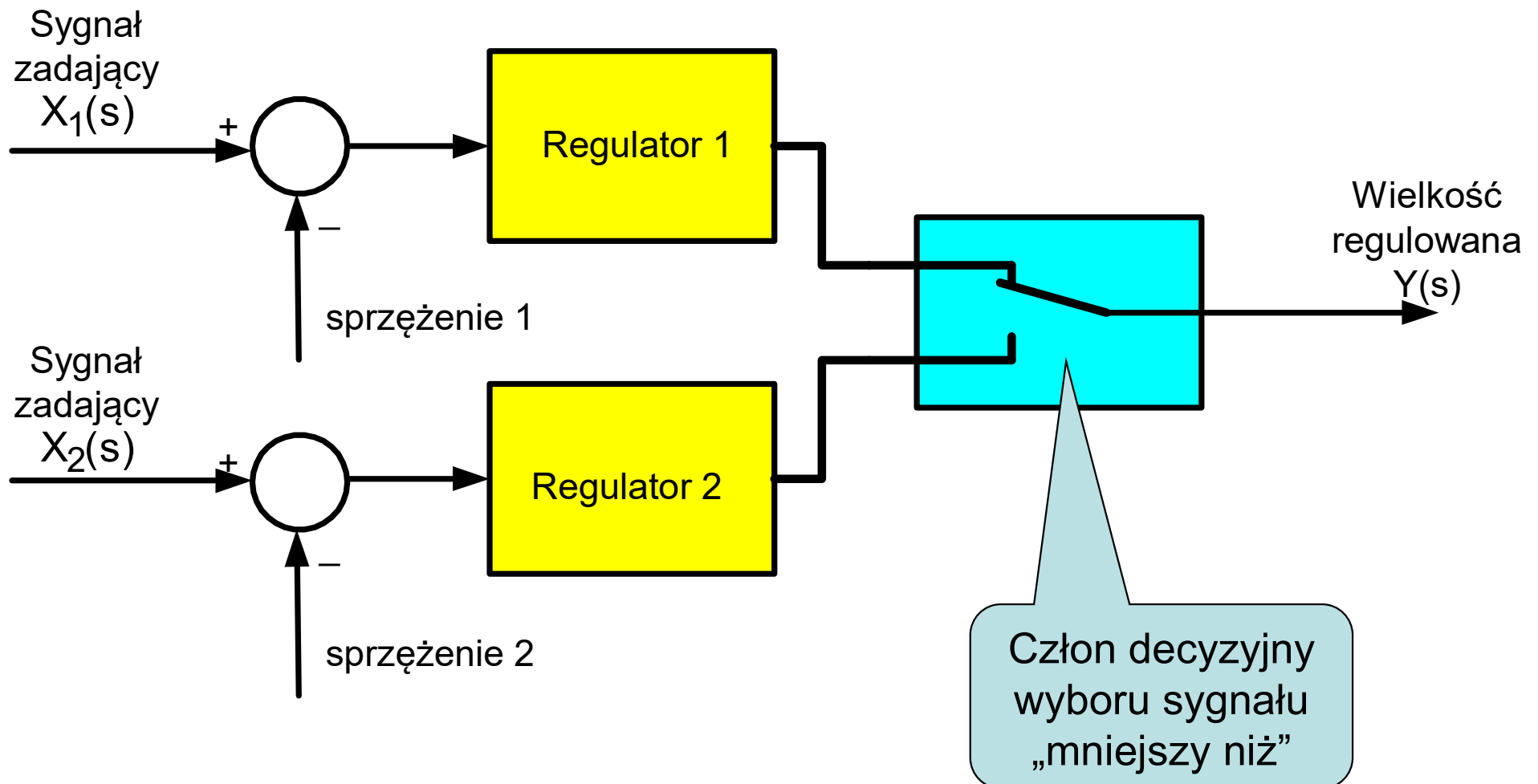
Struktury regulatorów

Struktura szeregowa



Struktury regulatorów (cd)

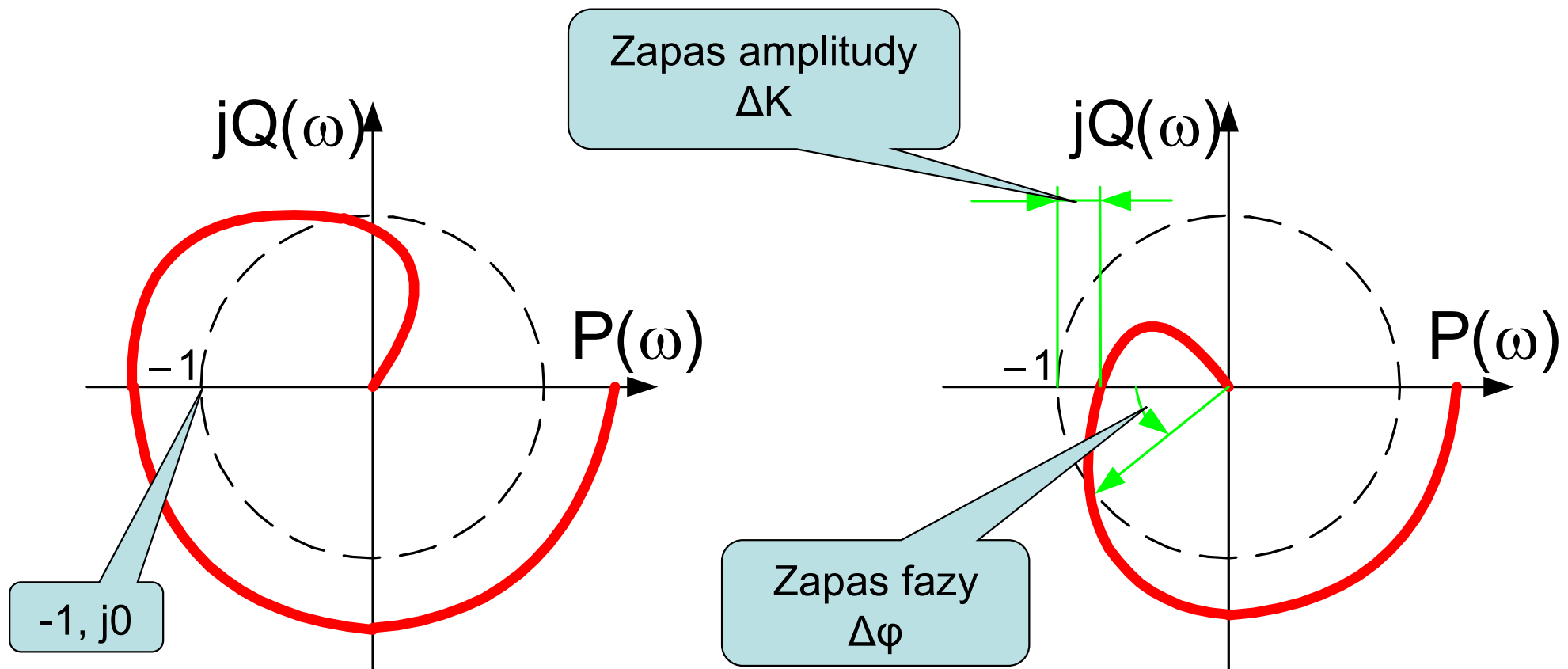
Struktura równoległa



Stabilność układu zamkniętego

Kryterium Nyguista

Układ zamkniętej regulacji jest stabilny, jeżeli charakterystyka amplitudowo-fazowa układu otwartego nie obejmuje punktu $(-1, j0)$ przy zmianie częstotliwości od 0 do ∞ .



Cel stosowania regulatora

Regulator o odpowiednio dobranej transmitancji $T_R(j\omega)$ wprowadza korektę przebiegu częstotliwościowej charakterystyki amplitudowo-fazowej układu otwartego.

Praktyczne zastosowanie znalazły regulatory typu:

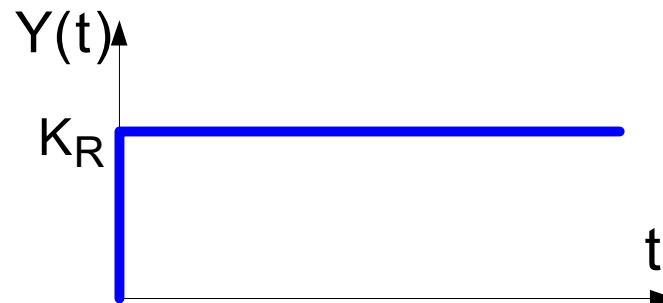
- proporcjonalnego (P),
- całkującego (I),
- proporcjonalno-całkującego (PI),
- proporcjonalno-różniczkującego (PD)
- proporcjonalno-całkująco-różniczkującego (PID).

Rodzaje regulatorów

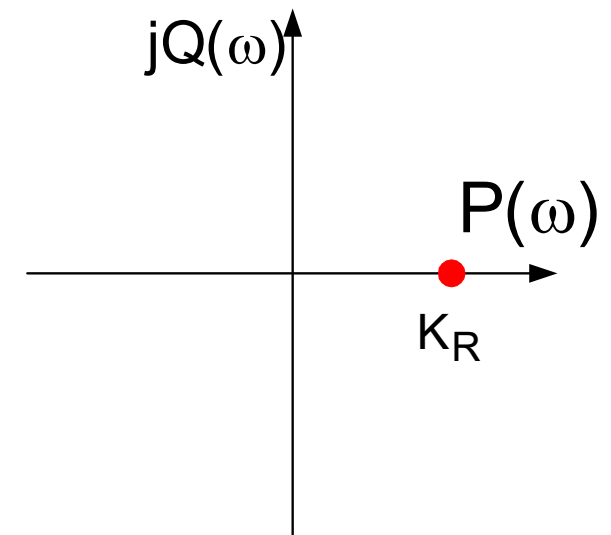
Proporcjonalny **P**

$$G_R(s) = K_R$$

Odpowiedz na skok jednostkowy

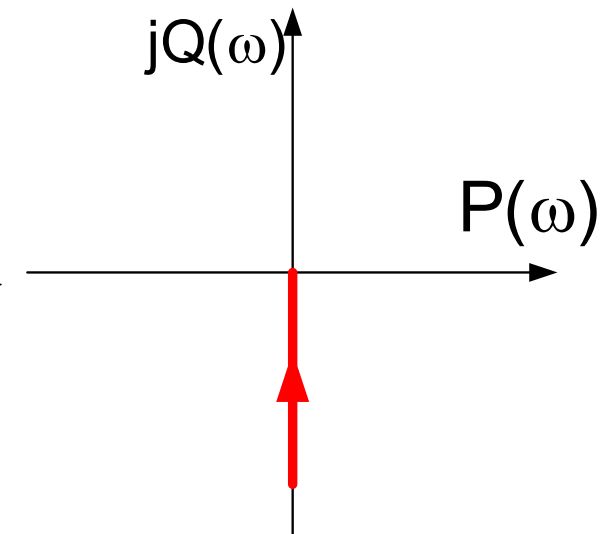
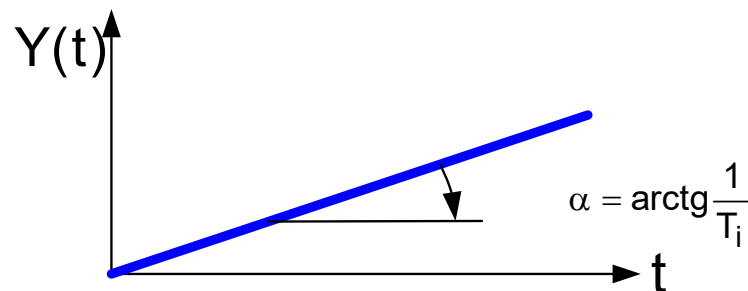


Charakterystyka amplitudowo-fazowa



Całkujący **I**

$$G_R(s) = \frac{1}{sT_i}$$



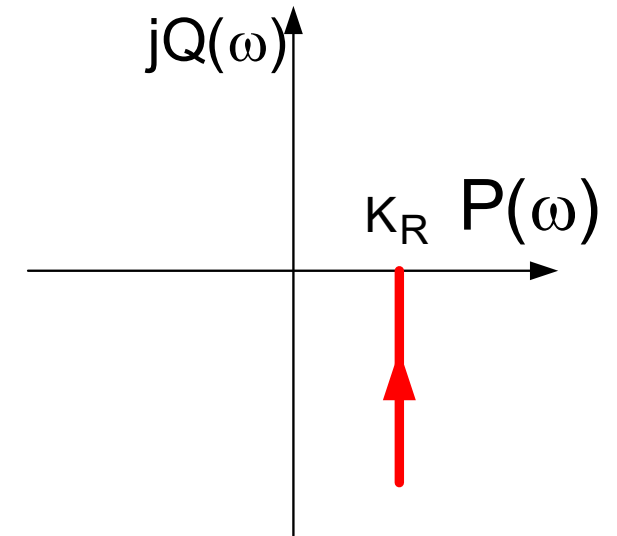
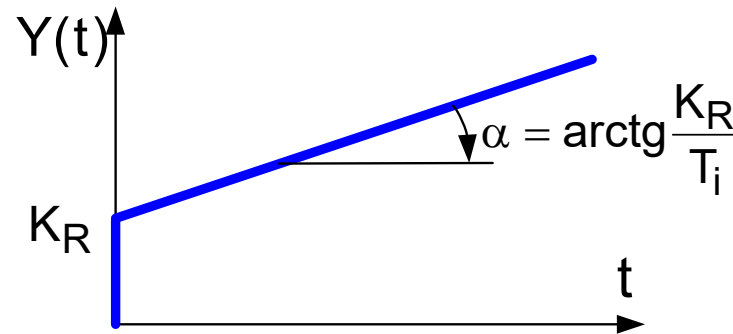
Rodzaje regulatorów (cd)

Odpowiedź na skok jednostkowy

Charakterystyka amplitudowo-fazowa

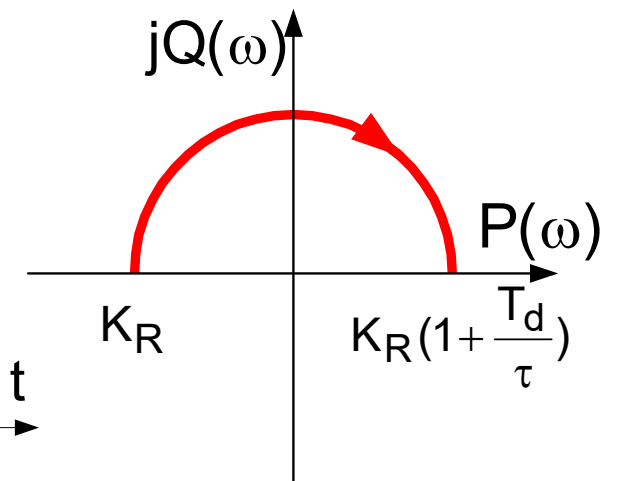
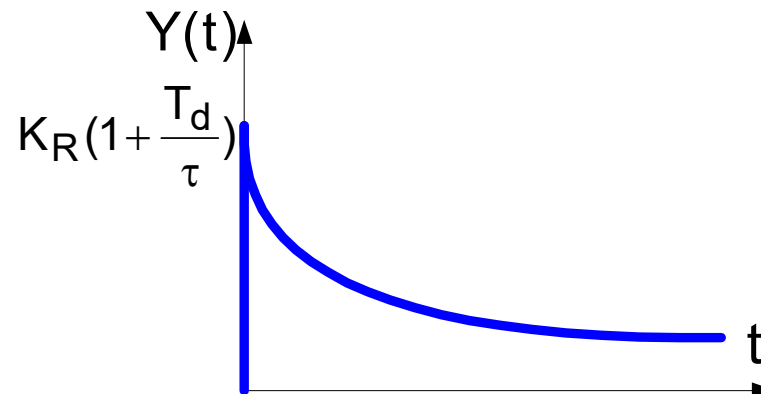
Proporcjonalno-całkujący **PI**

$$G_R(s) = K_R \left(1 + \frac{1}{sT_i} \right)$$



Proporcjonalno-różniczkujący **PD**

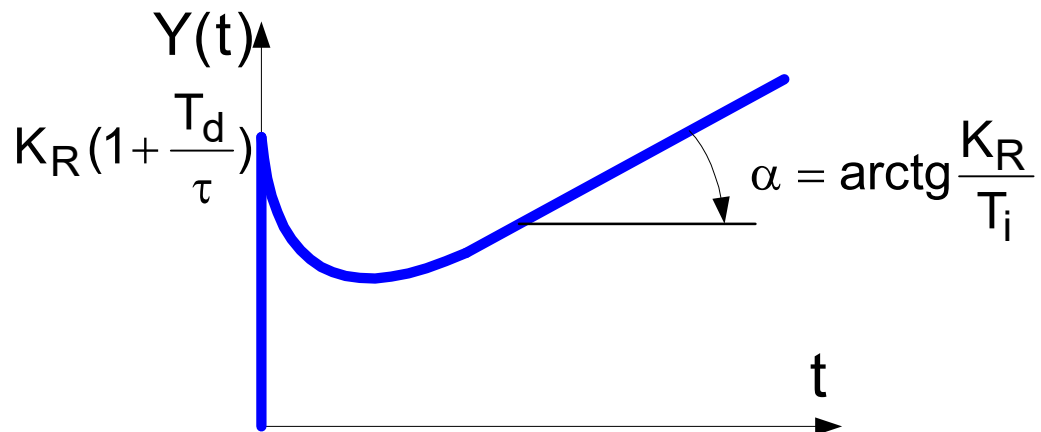
$$G_R(s) = K_R \left(1 + \frac{sT_d}{s \cdot \tau + 1} \right)$$



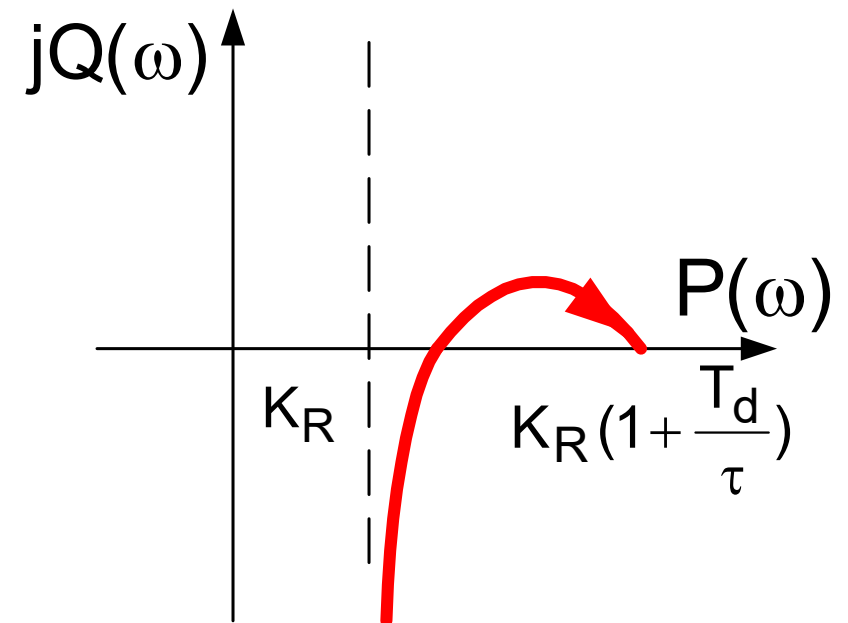
Rodzaje regulatorów (cd)

Proporcjonalno-całkująco-różniczkujący **PID**

Odpowiedź na skok
jednostkowy



Charakterystyka
amplitudowo-fazowa



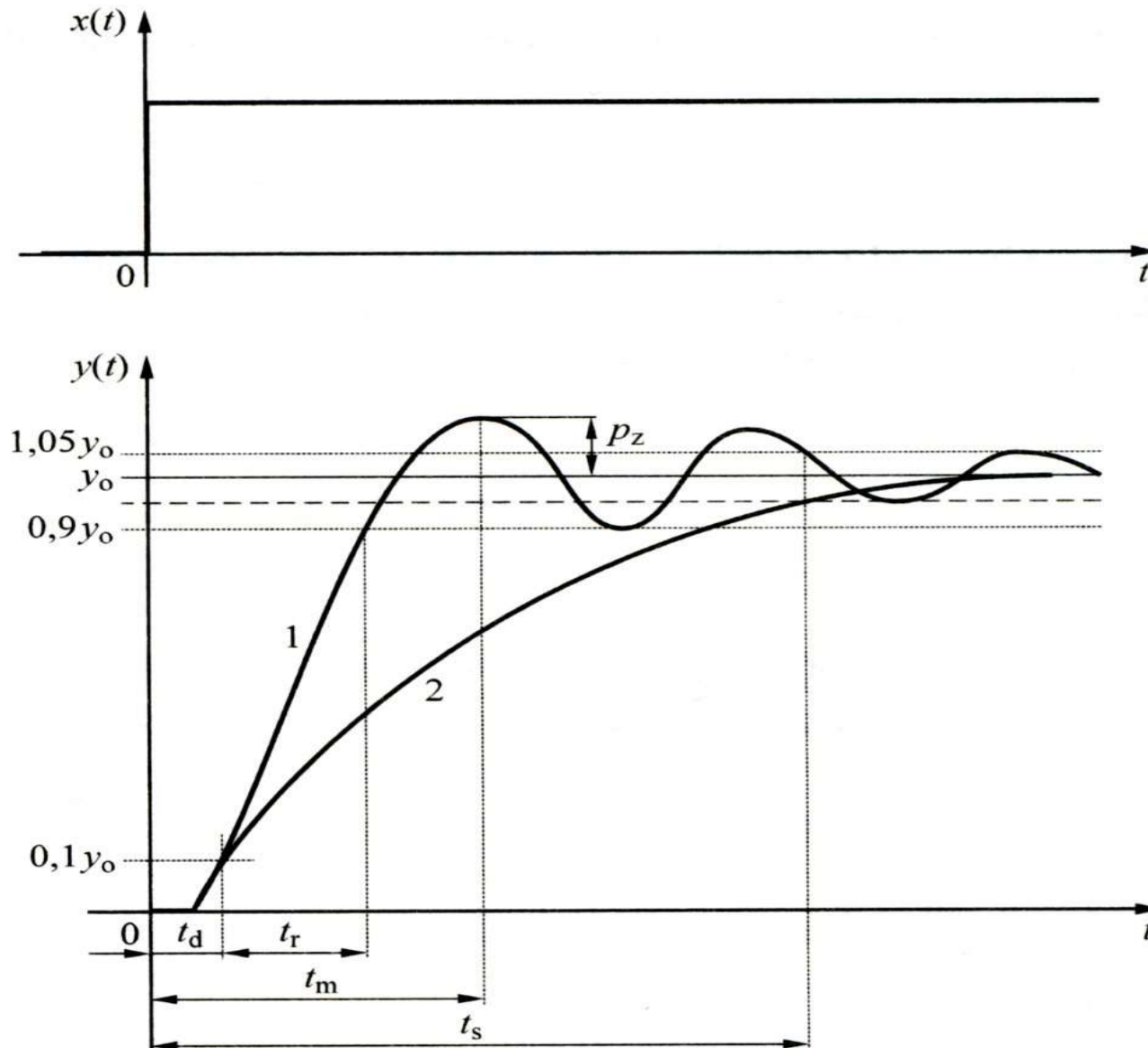
Ocena jakości działania regulatora

Do oceny jakości działania regulatorów stosuje się ujednolicone metody – zwane **kryteriami jakości**.

Dotyczą one głównie stanów dynamicznych, występujących przy zmianie wielkości sterowanych. Przyczyną takiej zmiany może być nastawienie nowej wartości zadanej lub wystąpienie zakłócenia w torze sterowania, polegające zwykle na zmianie warunków pracy układu.

Najczęściej kryteria jakości odnosi się do jednego z tych stanów, a mianowicie skokowej zmiany zadanej wielkości sterującej.

Ocena jakości działania regulatora (cd)



Kryteria jakości

Wskaźnik całkowy w postaci ogólnej:

$$I = \int_0^{t_s} [e(t)]^2 \cdot t^n dt$$

W praktyce stosuje się prostsze kryteria, dla których jest poszukiwane minimum jednego z poniżej przedstawionych wskaźników całkowych:

Całka z kwadratu błędu (ISE)

$$I_{ISE} = \int_0^{t_s} e(t)^2 dt$$

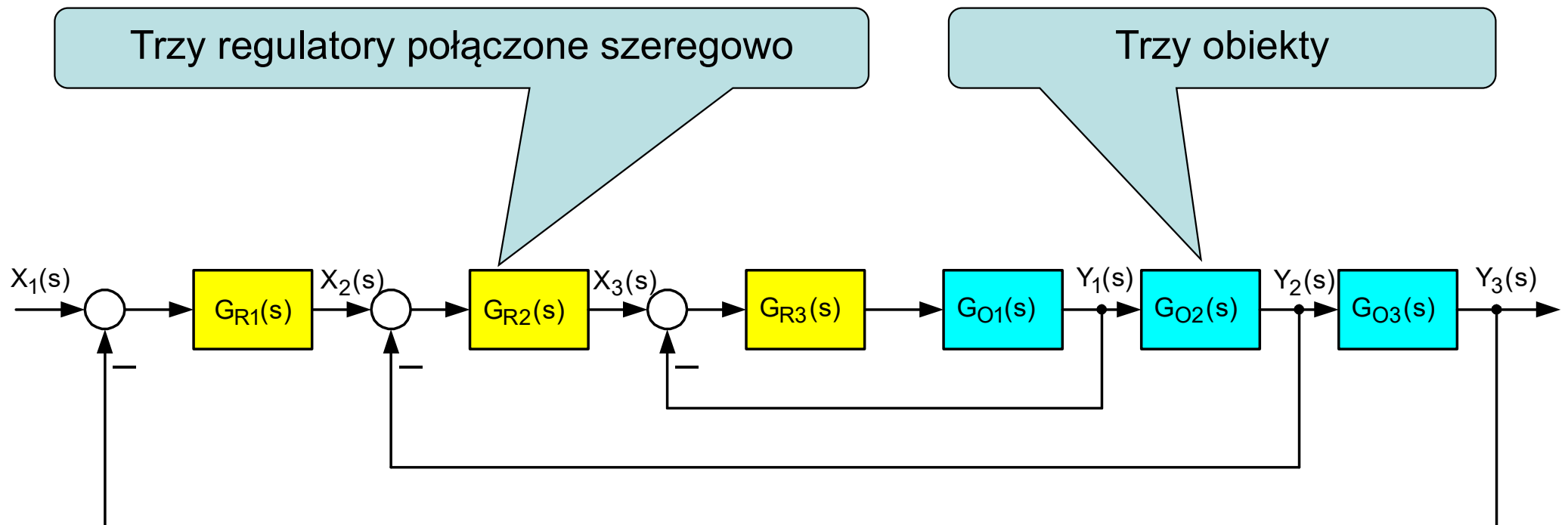
Całka z czasu mnożonego przez kwadrat błędu (ITSE)

$$I_{ITSE} = \int_0^{t_s} e^2 t dt$$

$$I_{ITSE} = \int_0^{t_s} e^2 t^2 dt$$

Całka z kwadratu czasu mnożonego przez kwadrat błędu (ISTSE)

Kaskadowe łączenie regulatorów



Realizacje techniczne regulatorów

W zależności od sposobu realizacji regulator może być wykonany jako **podzespół elektroniczny zbudowany z zastosowaniem wzmacniacza operacyjnego** lub też **stanowiąć procedurę w programie sterującym mikrokontrolera**.

W każdym z tych przypadków jest wyodrębniony jako blok funkcjonalny, opisany transmitancją i charakteryzujący się odpowiednio dobranymi **nastawami**.

Regulatory ciągłe (analogowe) są stosowane w coraz mniejszym zakresie, jednak w przypadku urządzeń pracujących z dużą częstotliwością, np. przekształtniki energoelektroniczne, nie mogą być zastąpione przez regulatory **dyskretne (cyfrowe)**.

Specjalną grupę regulatorów stanowią **regulatory nieliniowe typu dwustanowego**.

Nowoczesne metody sterowania umożliwiają wprowadzenie do układów sterowania bloków charakteryzujących się zdolnościami podobnymi do rozumu ludzkiego. Mówimy wtedy o **regulatorach z elementami sztucznej inteligencji**.

Dwie metody znalazły w ostatnich czasach szczególne zastosowanie – **sieci neuronowe i układy logiki rozmytej**. Główną zaletą tych regulatorów jest niewielka wrażliwość na zmiany parametrów układów i odporność na zakłócenia.

Nastawy regulatorów ciągłych

K_R – współczynnik proporcjonalności

T_i – **czas zdwojenia** (zwany stałą całkowania) określa czas potrzebny na to, by przy wymuszeniu skokowym na wejściu regulatora na wyjściu uzyskać sygnał dwukrotnie większy od tego, który wynika ze współczynnika K_R

T_d – **czas wyprzedzenia**, to czas, po upływie którego, po podaniu na wejście regulatora PD sygnału narastającego liniowo sygnał na wyjściu regulatora osiągnie dwukrotną wartość sygnału wyjściowego.

Proces doboru nastaw, przy których uzyskuje się najkorzystniejsze z punktu widzenia przyjętego kryterium jakości przebiegi dynamiczne układu nazywamy **optymalizacją**.

Dobór nastaw według kryterium modułu

Aby uzyskać możliwie szybko narastającą odpowiedź układu przy niewielkim przeregulowaniu stosuje się kryterium modułu.

Transmitacja obiektu Nastawy			$G(s) = \frac{e^{-T_0 s}}{1 + T_1 s}$ $d = \frac{T_1}{T_0} > 2$	$G(s) = \frac{1}{(1 + T_1 s)(1 + \sum \tau s)}$ $T_1 \gg \sum \tau$ $\sum \tau$ – suma małych stałych czasowych	$G(s) = \frac{1}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)(1 + \sum \tau s)}$ $T_1 T_2 \gg \sum \tau$
Typ regulatora	P	K_R	$= \frac{d^2}{1 + 2d}$	$\approx \frac{T_1}{2 \sum \tau}$	$= \frac{1}{2} \left(\frac{T_1}{T_2} + \frac{T_2}{T_1} \right)$
		$\frac{T_i}{K_R}$	$\approx 2(T_1 + T_0)$	$\approx \frac{T_1}{2 \sum \tau}$	$= 2(T_1 + T_2)$
	PI	K_R	$\approx \frac{d}{2} + \frac{1}{12d}$	$\approx \frac{T_1}{2 \sum \tau}$	$= \frac{1}{2} \left(\frac{T_1}{T_2} + \frac{T_2}{T_1} \right)$
		T_i	$\approx T_1 + \frac{T_0^3}{6T_1^2}$	$\approx T_1$	$= T_1 + \frac{T_2}{1 + \frac{T_1}{T_2} + \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^2}$
	PID	K_R			$= \frac{(T_1 + T_2)}{2 \sum \tau}$
		T_i			$= (T_1 + T_2)$
		T_d			$= \frac{T_1 T_2}{2 \sum \tau}$

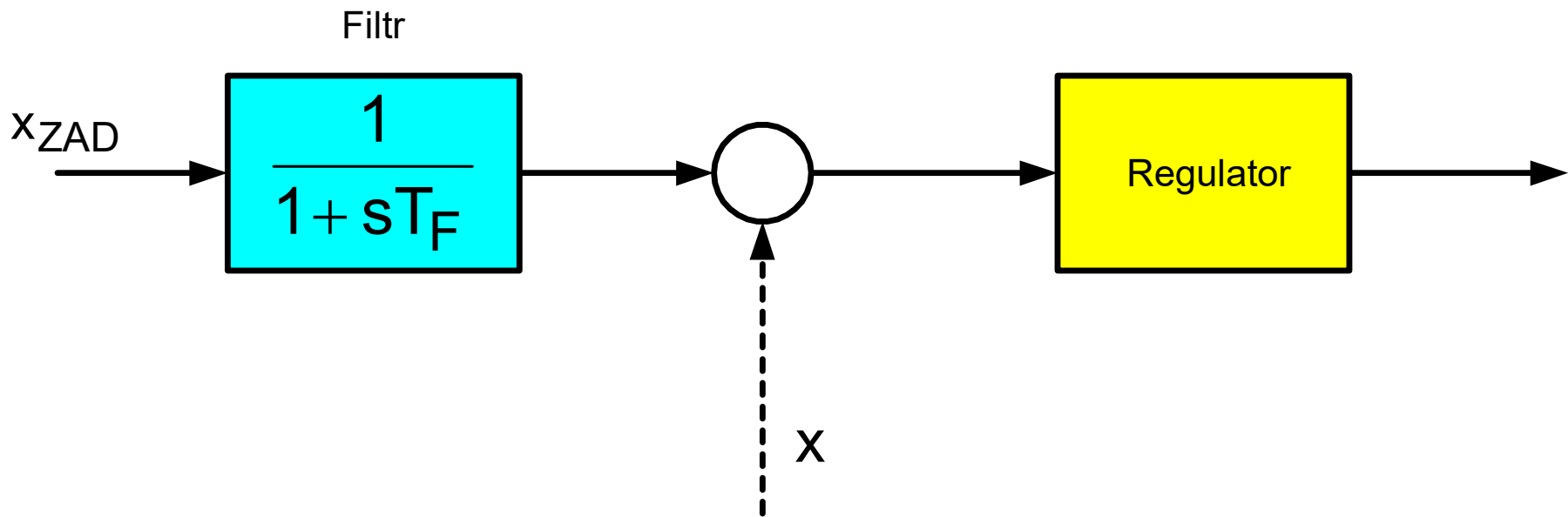
Dobór nastaw według kryterium symetrii

Jeżeli reakcja regulatora dobranego według kryterium modułu jest za wolna stosuje się kryterium symetrii.

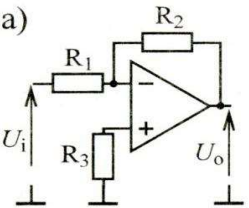
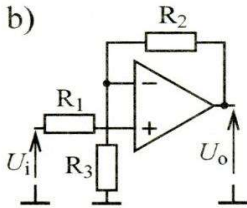
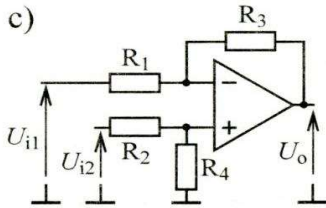
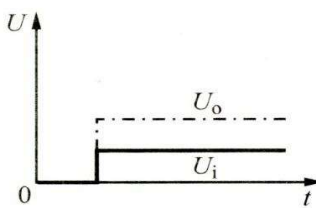
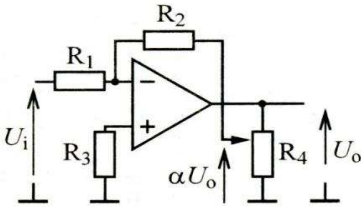
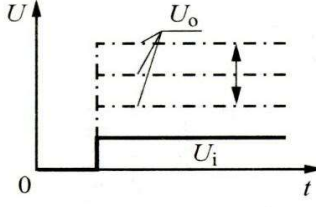
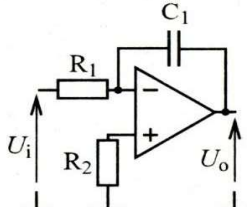
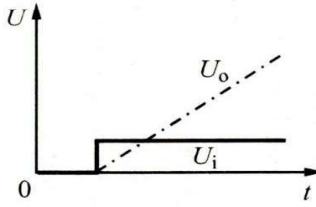
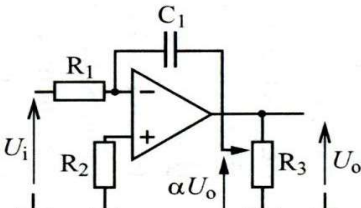
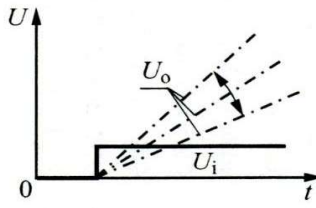
$G_2(s) = \frac{K}{(1 + T_1 s) (1 + \sum \tau_\mu s)}$ $(T_1 \gg \sum \tau_\mu)$	$G_3(s) = \frac{K}{(1 + T_1 s) (1 + T_2 s) (1 + \sum \tau_\mu s)}$ $(T_1, T_2 \gg \sum \tau_\mu)$
<p>Zalecany regulator PI o nastawach:</p> $K_R = \frac{T_1}{2 K \sum \tau_\mu}$ $T_i = 4 \sum \tau_\mu$	<p>Zalecany regulator PID o nastawach:</p> $K_R = \frac{T_1 T_2}{8 (\sum \tau_\mu)^2}$ $T_i = 8 \sum \tau_\mu$ $T_d = 4 \sum \tau_\mu$

Filtr na wejściu zadającym

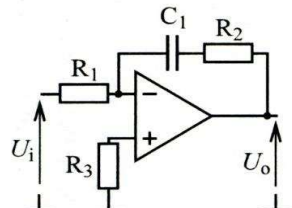
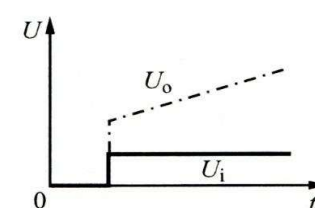
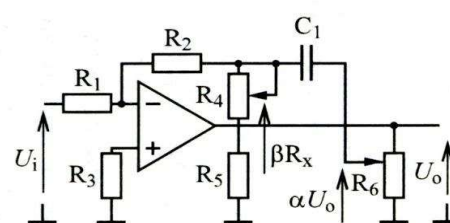
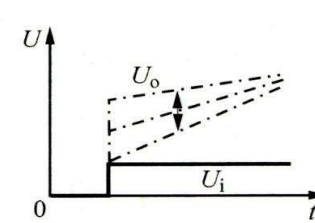
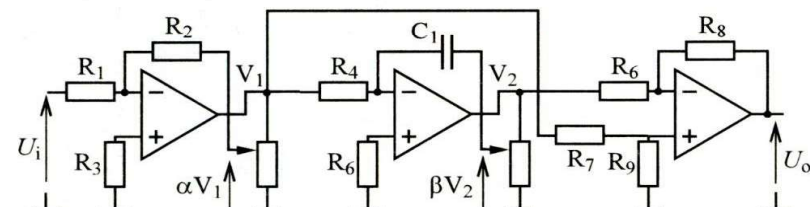
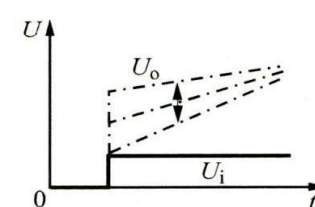
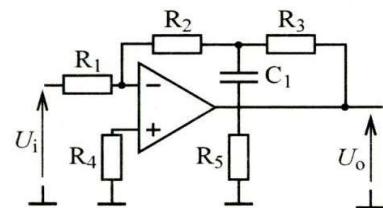
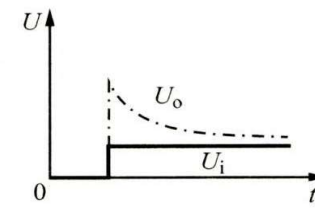
W celu uniknięcia znacznego przeregulowania w odpowiedzi na skokową zmianę wielkości zadanej, przy doborze nastaw według kryterium symetrii, należy na wejściu zadającym zastosować **filtr**, który ogranicza szybkość zmian sygnału zadającego.



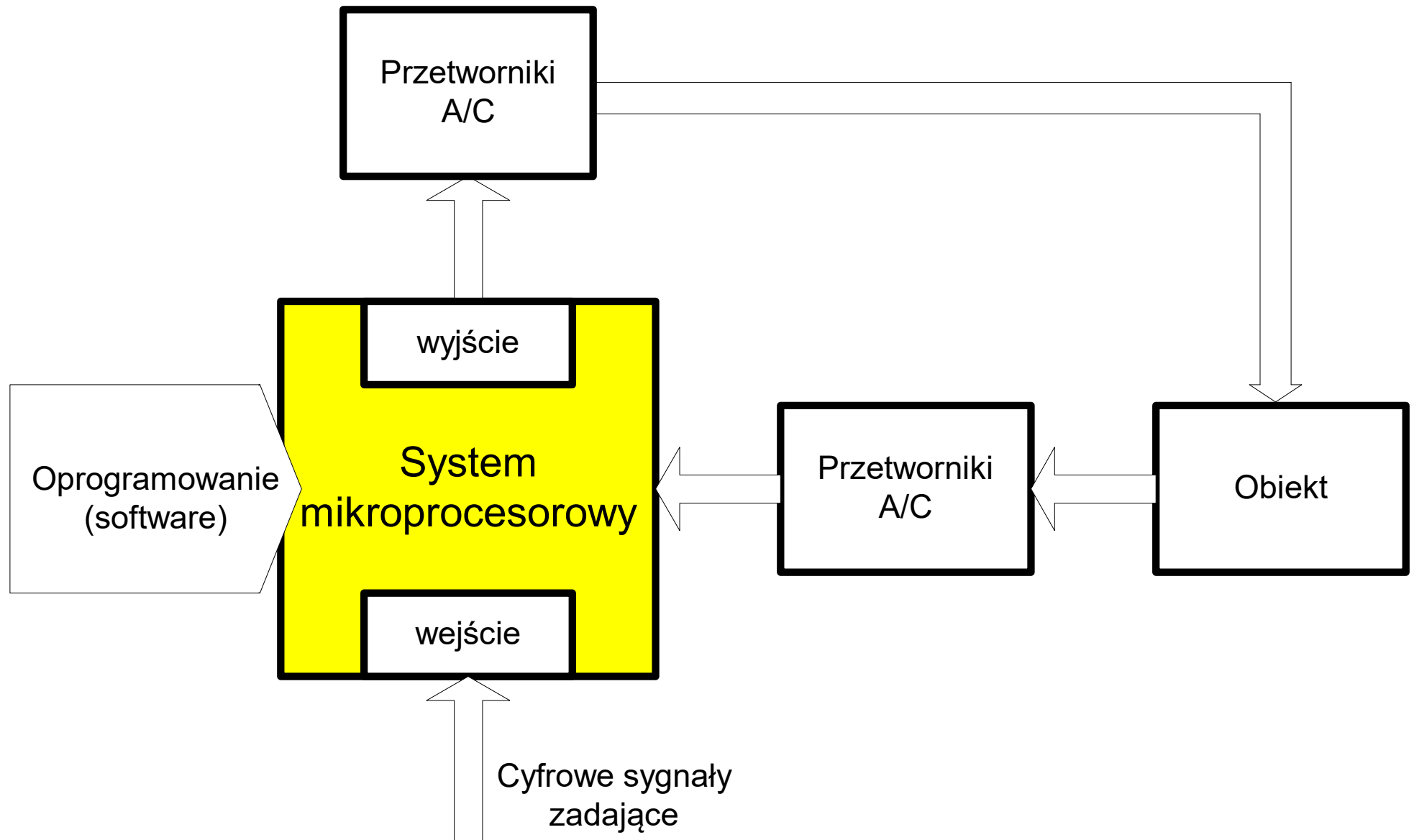
Topologie regulatorów P oraz I

Funkcja	Schemat	Zależność pomiędzy parametrami RC i nastawami	Odpowiedź na skok jednostkowy
P	<p>a) </p> <p>b) </p> <p>c) </p> <p>$R_1 = R_2; R_3 = R_4$</p>	<p>a) $K_R = R_2/R_1$</p> <p>b) $K_R = 1 + R_2/R_1$</p> <p>c) $K_R = \frac{U_o}{U_{i1} - U_{i2}} = R_3/R_1$</p>	
P	 <p>$R_4 \ll R_2$</p>	$K_R = \frac{R_2}{\alpha R_1}$	
I		$T_i = R_1 C_1$	
I	 <p>$R_3 \ll R_1$</p>	$T_i = R_1 C_1 \alpha$	

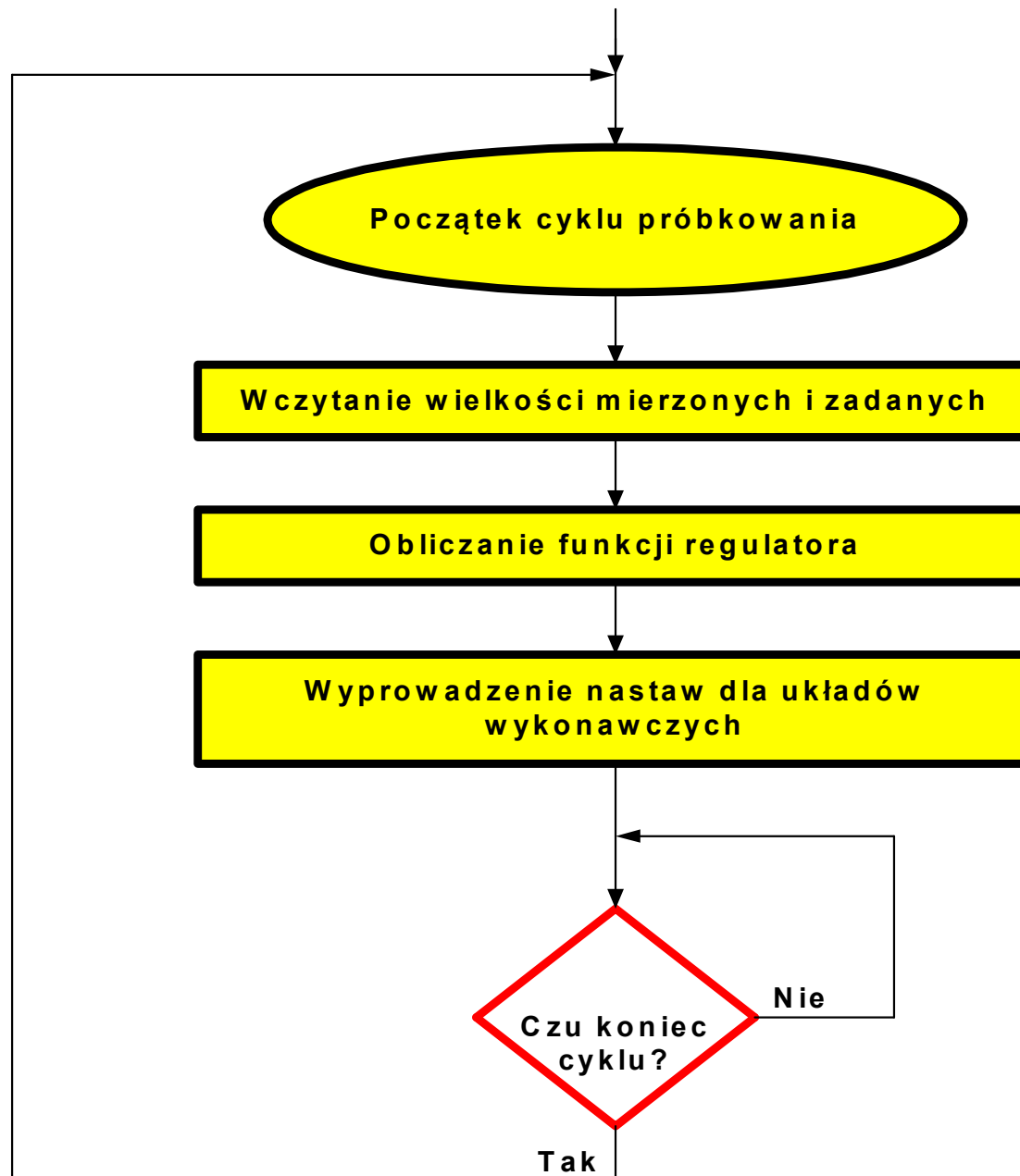
Topologie regulatorów PI oraz PD

Funkcja	Schemat	Zależność pomiędzy parametrami RC i nastawami	Odpowiedź na skok jednostkowy
PI		$K_R = R_2/R_1$ $T_i = C_1 R_2$	
PI	 $R_4 + R_5 \approx 10 R_2$ $R_5 \approx 0,1 R_2$ $R_x = R_4 + R_5$	$K_R = \frac{K_\alpha R_2}{\alpha R_1}$ $T_n = C_1 K_\alpha \cdot \frac{R_2 \beta (R_4 + R_5)}{R_2 + \beta (R_4 + R_6)}$ $K_\alpha = 1 + (\alpha - \alpha^2) \frac{R_6}{R_2}$	
PI		$K_R = \frac{R_2}{\alpha R_1}$ $T_i = \beta R_4 C_1$	
PD	 $G_R(s) = \frac{K_R (1 + s T_d)}{1 + s t_d}$	$K_R = \frac{R_2 + R_3}{R_1}$ $T_d = \left(\frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} + R_5 \right) C_1$ $t_d = R_5 C_1$	

Regulatory dyskretne

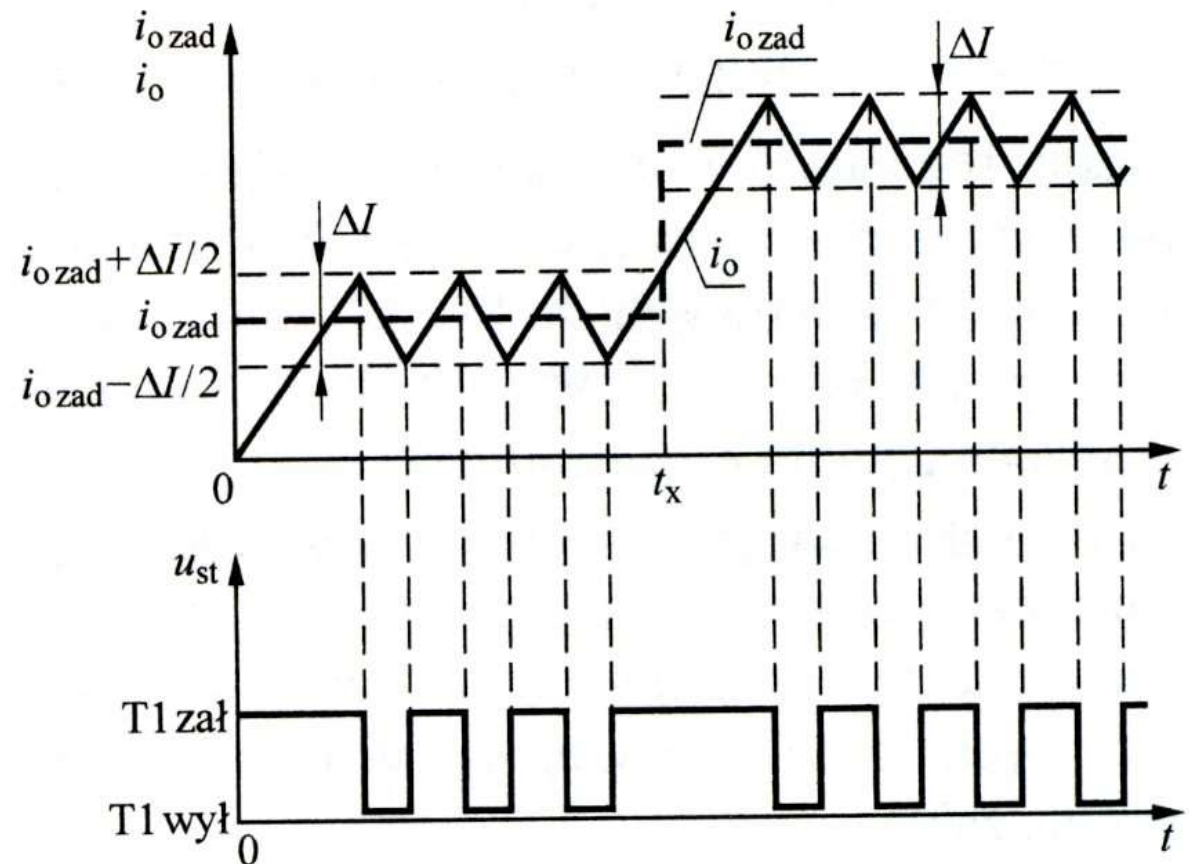
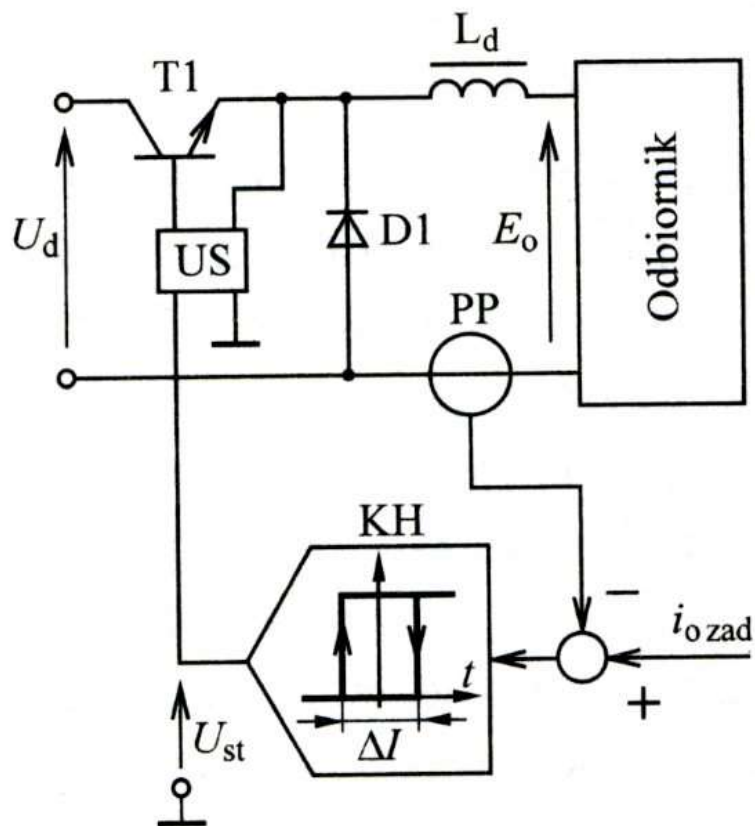


Sieć działań regulatora dyskretnego



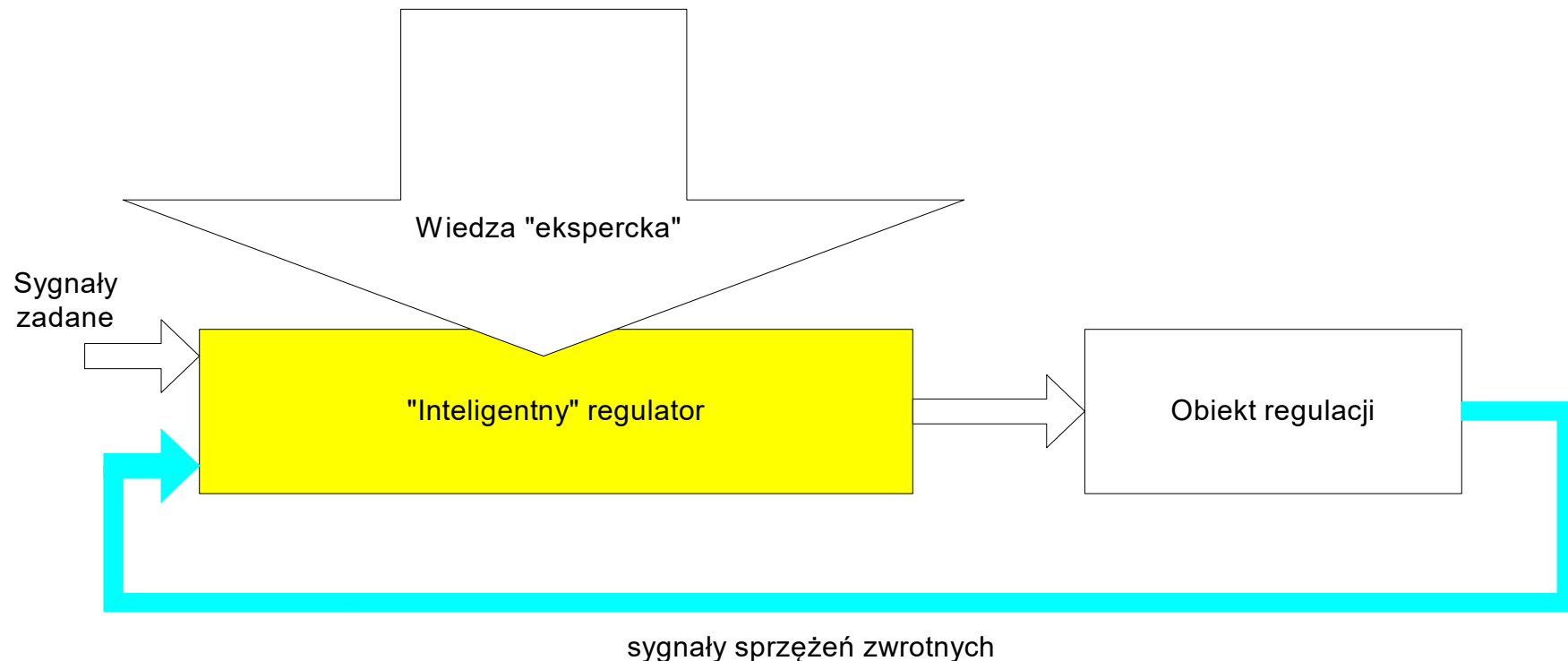
Regulatory nieliniowe

Regulator dwupołożeniowy

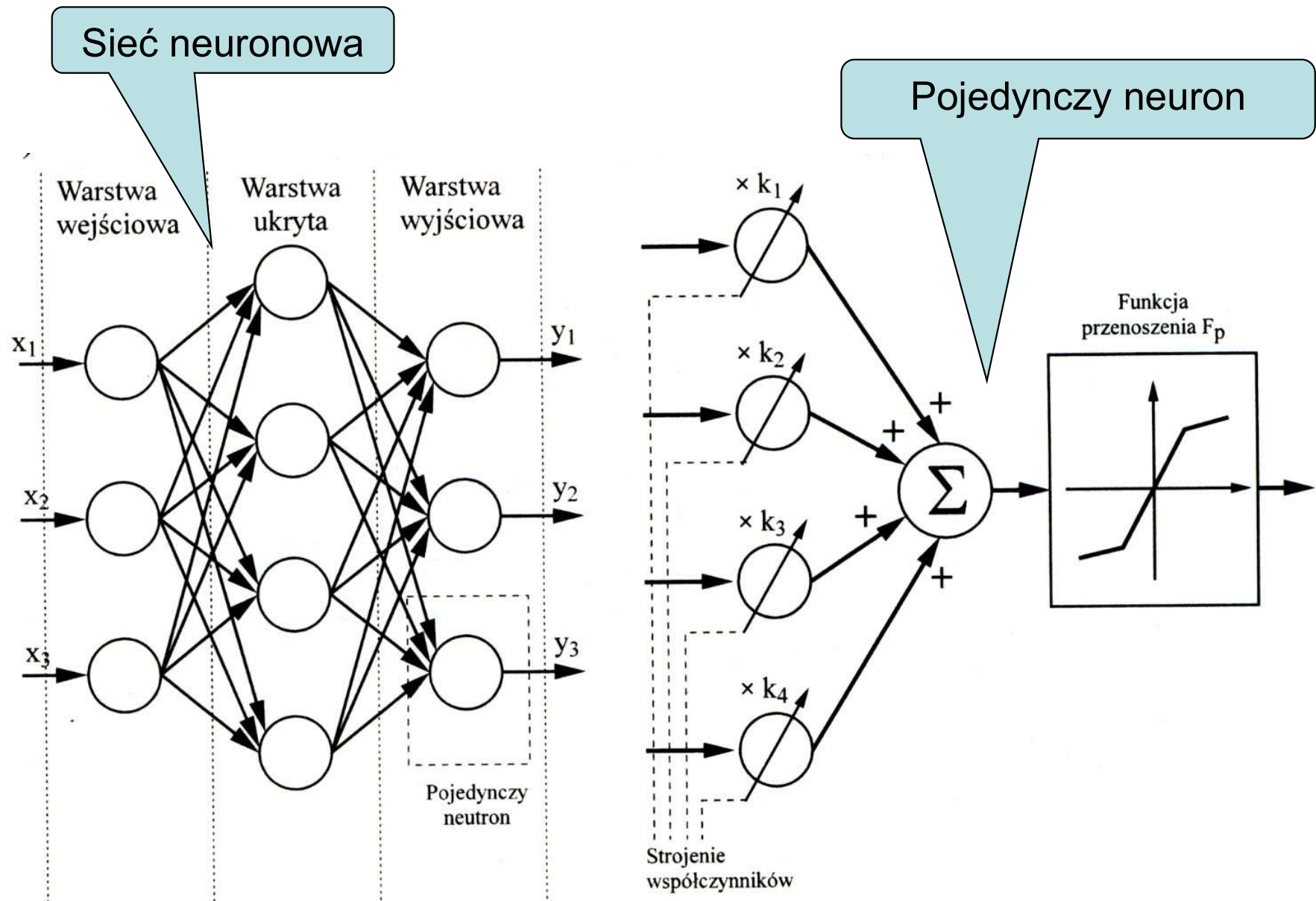


Regulatory o sztucznej inteligencji

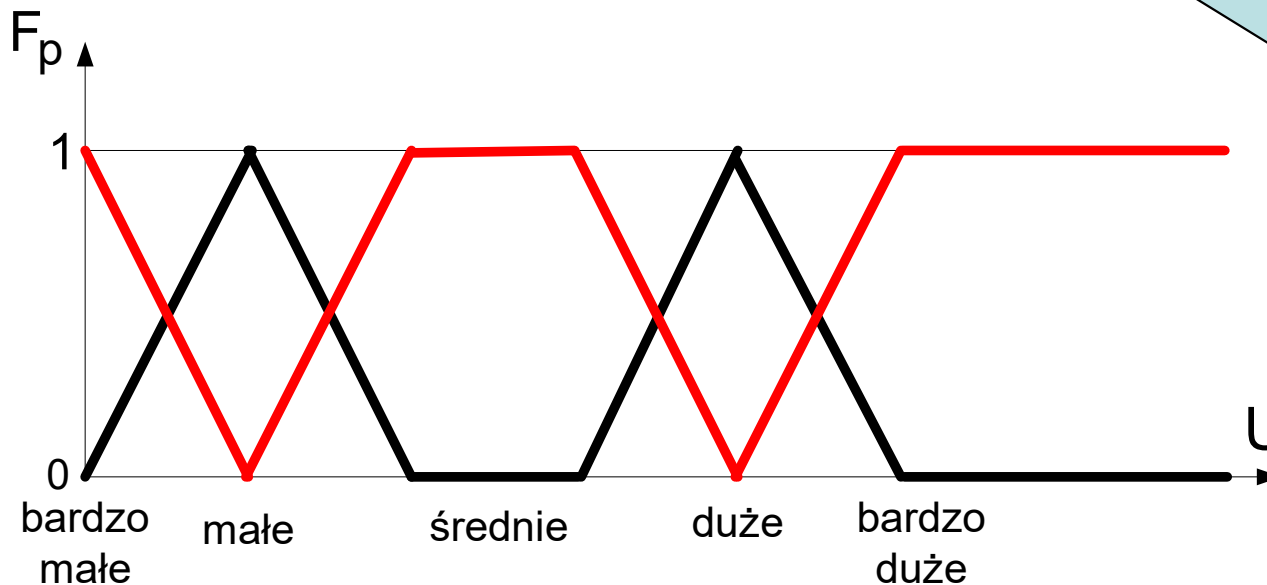
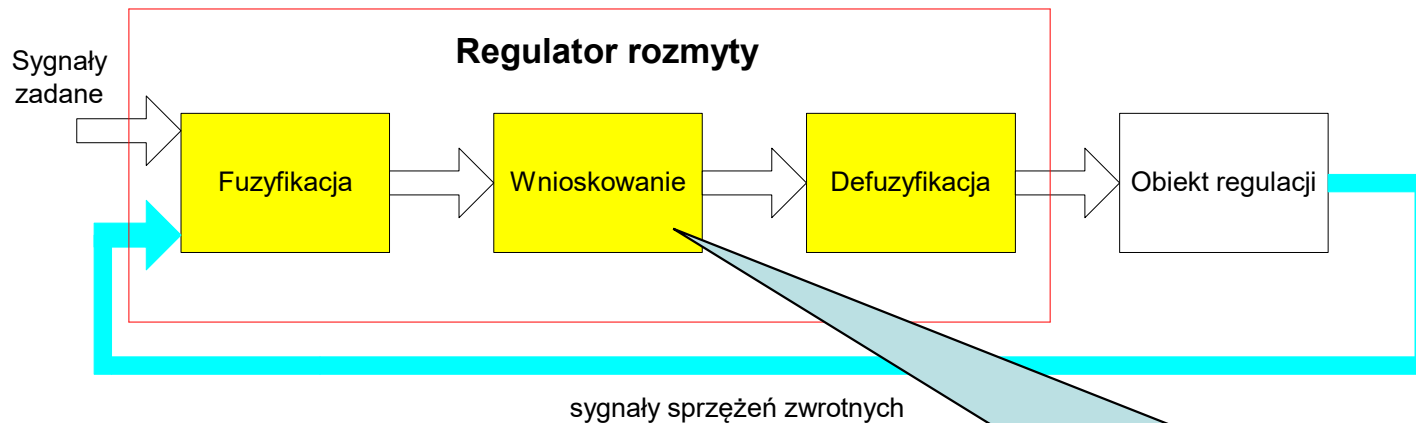
Pojęcie sztucznej inteligencji wiąże się z dążeniem automatyków do stworzenia układów sterowania, które mogłyby samoczynnie dopasować sposób swego działania do zmiennych warunków pracy. Szczególnie intensywnie pracowano nad dwiema metodami tworzenia inteligentnych układów sterowania: **sztucznych sieci neuronowych i logiki rozmytej**.



Sztuczne sieci neuronowe



Logika rozmyta (fuzzy logic)



Wnioskowanie
w oparciu
o zestaw reguł
eksperckich
[...jeżeli...to...]
Modyfikacja
funkcji
przynależności
wielkości
wyściowych

Zastosowania regulatorów fuzzy logic

Regulatory rozmyte mają szczególne zastosowanie w odniesieniu do sterowania procesami, dla których nie istnieją ścisłe modele matematyczne, a wiedza o obiekcie sterowania jest **wiedzą doświadczalną typu eksperckiego**.

Poza pośrednim zastosowaniem regulatorów „rozmytych” istnieje możliwość ich wykorzystywania do przestrajania parametrów regulatorów zwykłych PI lub PID.

Dzięki takiej adaptacji uzyskuje się znacznie korzystniejsze właściwości dynamiczne układu regulacji.

Bibliografia

1. Barlik R., Nowak M.: Układy sterowania i regulacji urządzeń energoelektronicznych, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1998
2. Kaźmierkowski M. P., Matysik J. T.: Wprowadzenie do elektroniki i energoelektroniki, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005