

1. WPROWADZENIE

Systemy sterowania stały się integralną częścią współczesnego świata. Otaczają nas liczne aplikacje: sterowanie temperaturą w samochodach, w domach, w piecach hutniczych itd., sterowanie poziomem cieczy, utrzymywanie stałego stosunku dwóch cieczy, wystrzelenie na orbitę obiektu latającego, utrzymywanie w pionie ostatnio wymyślonego skutera dwukołowego Segway, itd. Ale obok wymyślonych przez człowieka systemów istnieją liczne systemy sterowania w naturze np. odruch bezwarunkowy gdy dotkniemy gorącego przedmiotu, podczas stresu wzrasta poziom adrenaliny gdyż zwiększa się częstotliwość skurczów serca powodując zwiększoną dostawę tlenu do naszych komórek, proces śledzenia przez oczy poruszającego się obiektu, itd.

Uogólniając można powiedzieć, że *system sterowania* składa się z podsystemów (elementów) i procesów (obiektów sterowania) połączonych w sposób zapewniający sterowanie tymi procesami według określonego celu. Budowę systemów sterowania realizuje się podczas procesu, który nazywamy *automatyzacją*.

Pierwsze prymitywne a potem bardziej skomplikowane maszyny, ułatwiły pracę człowiekowi. Był to okres mechanizacji, który jednak nie wyeliminował człowieka z procesów wytwarzania. Dopiero automatyzacja bazująca na doskonałych maszynach umożliwia odsunąć człowieka od procesu wytwarzania.

Automatyzacja procesów technologicznych (np. walcowania, mielenia, naprowadzania rakiet, śledzenia obiektów kosmicznych itp.) obejmuje:

- *sterowanie*, czyli celowe (zgodne z przyjętym kryterium jakości sterowania) oddziaływanie na proces w układzie otwartym lub zamkniętym,
- zabezpieczenia i blokady,
- sygnalizacja stanów normalnej i awaryjnej pracy,
- pomiar wielkości fizycznych charakteryzujących dany proces (zbieranie informacji),
- przekazywanie wyników na odległość (transmisja danych),
- przetwarzanie wyników na inną dogodną postać.

Automatyzacja bazuje na dziedzinie wiedzy jaką jest *automatyka*. Potocznie „automatyką” nazywa się zestaw urządzeń technicznych umożliwiających zautomatyzowanie danego procesu (maszyny). Urządzenia, noszące nazwę *elementów automatyki* mogą być połączone w rozmaity sposób tworząc łącznie z *obiektem sterowania* (np. maszyną, komorą chłodniczą) *systemy sterowania (układy automatyki)*. Tutaj należy podkreślić, że pojęcie system sterowania zaczerpnięte bezpośrednio z języka angielskiego (ang. control system) dotyczy wszystkich systemów, natomiast pojęcie układu, które nie istnieje w literaturze angielskiej, w języku polskim dotyczy systemów jednowymiarowych tzn. z jednym wejściem i jednym wyjściem.

Można wyróżnić następujące elementy automatyki:

- pomiarowe (czujniki, przetworniki, termostaty, itd.),
- zadające (nastawniki, panele sterujące, klawiatury itp.),
- wykonawcze (siłowniki, silniki, styczniki, grzałki, pompy itp.),
- regulatory, które mogą być zrealizowane w postaci fizycznej lub programu komputerowego.

1. Wprowadzenie

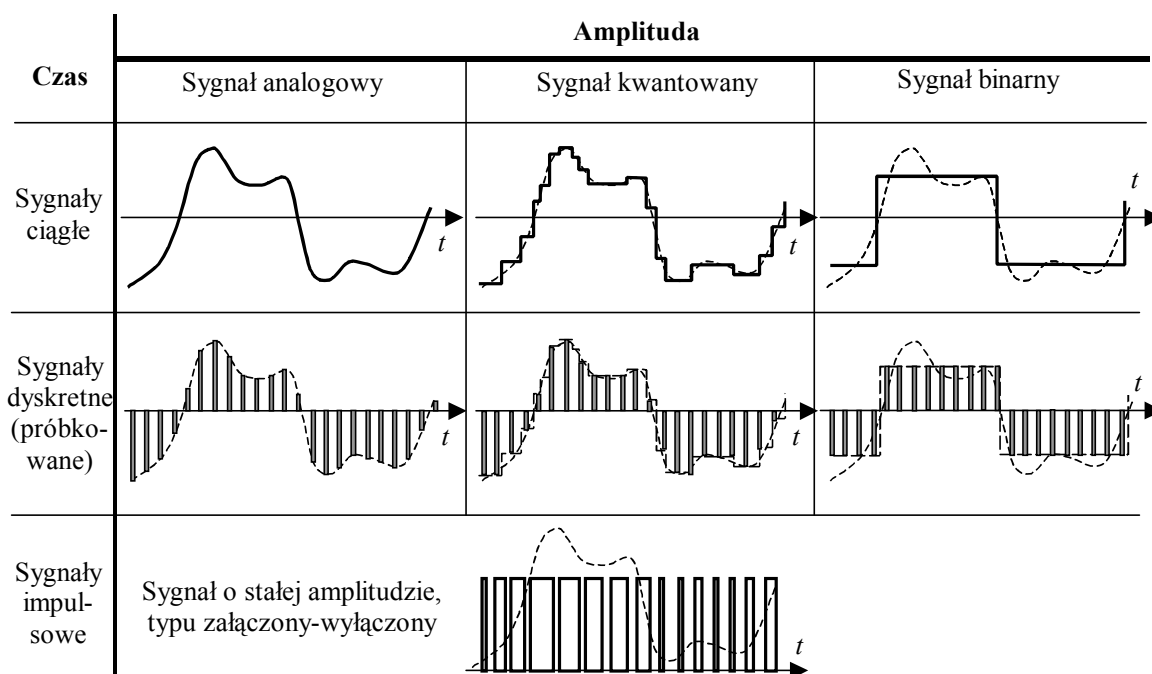
Drugim pojęciem nierozzerwalnie związanym z systemem sterowania obok elementu automatyki jest sygnał. *Sygnałem* nazywamy dowolną wielkość fizyczną niosącą informację. W systemach sterowania mamy do czynienia z sygnałami:

- elektrycznymi,
- mechanicznymi,
- hydraulicznymi,
- pneumatycznymi.

W taki sam sposób możemy podzielić systemy sterowania.

Kolejny podział sygnałów to:

- ♦ *deterministyczne* (dają się opisać ściśle określoną zależnością matematyczną, są powtarzalne): harmoniczne, poliharmoniczne, prawie okresowe i przejściowe oraz *stochastyczne (losowe)* które opisuje się za pomocą:
 - parametrów rozkładu zmiennej losowej (wartość średniokwadratowa² -wartość średnia² = wariancja², mediany itd.)
 - funkcji w dziedzinie amplitud - dystrybuanta, rozkład prawdop. amplitud w dziedzinie czasu - korelacja w dziedzinie częstotliwości - gęstość widmowa mocy
- ♥ niemodulowane i modulowane,
- ♣ ciągłe (określone w każdej chwili czasowej lub inna definicja to o czasie próbkowania dążącym do zera), dyskretne (określone tylko w chwilach próbkowania) i impulsowe. Np. sygnał z indukcyjnego czujnika zbliżeniowego jest sygnałem binarnym ciągłym ale po prowadzeniu go do sterownika lub komputera staje się sygnałem binarnym dyskretnym.



1.1. Systemy sterowania

Istnieją dwa podstawowe systemy sterowania:

- otwarty (ang. open-loop systems),
- zamknięty (ang. closed-loop systems) czyli w układzie ze sprzężeniem zwrotnym (układzie regulacji).

Jak widać regulacja jest pojęciem węższym od pojęcia sterowania.

Układ otwarty sterowania składa się z elementu sterującego (wykonawczego) i obiektu sterowania (rys.1a). Element sterujący nie otrzymuje żadnych informacji o sygnale wyjściowym y , natomiast ma określony cel sterowania reprezentowany tu przez wartość zadaną y_0 . Ponadto jest możliwe wykorzystanie informacji od znanego zakłócenia z_1 i wykonanie odpowiedniej korekcji sygnału zadanego. Występowanie silnych zakłóceń z powoduje jednak duże zmiany sygnału wyjściowego y , co zilustrowano w przebiegu sygnału y na rysunku 1a.

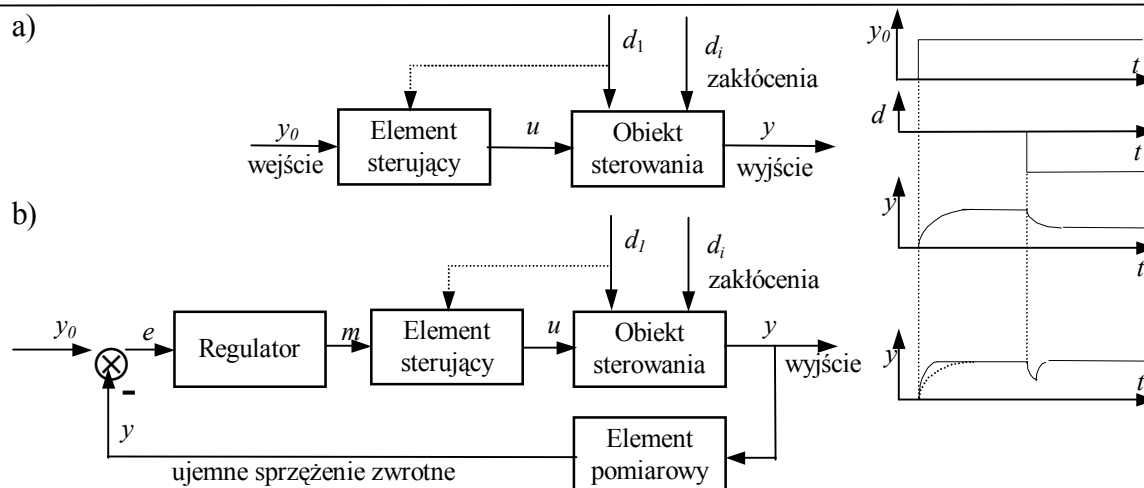
Układ zamknięty sterowania, nazywany również układem regulacji, otrzymujemy w wyniku podania sygnału wyjściowego na wejście przy użyciu ujemnej *pętli sprzężenia zwrotnego* (ang. feedback-loop). Podczas eksploatacji na obiekt wpływają zakłócenia, z których jedne mogą zmieniać nieznacznie parametry obiektu np. tłumienie, sprężystość, przewodność cieplna, co wynika ze starzenia się elementów lub oddziaływania zewnętrznych czynników atmosferycznych zwłaszcza zmian temperatury (powoduje to tzw. *niestacjonarność procesu* w którym ten obiekt występuje), natomiast drugie powodują zmianę wartości sygnałów w układzie np. głównym zakłóceniem w napędach jest moment obciążenia, w komorze chłodniczej zakłóceniami są jej nieszczelność i moment wprowadzania wsadu.

Stąd podstawowym zadaniem układu regulacji jest osiągnięcie celu bez względu na oddziaływanie zakłóceń. Cele układu regulacji wynikają z ich typu. Podstawowym typem jest *układ regulacji stałwartościowej* czyli utrzymanie sygnału wyjściowego na stałym poziomie niezależnym od oddziaływujących zakłóceń. W *układzie regulacji nadeżnej* (śledzącej) sygnał wejściowy zmienia się dowolnie, zgodnie z wymogami procesu technologicznego natomiast sygnał wyjściowy nadeża precyzyjnie za tymi zmianami. Z tym typem układów mamy do czynienia np. w lotnictwie do naprowadzania samolotów, podczas precyzyjnej regulacji kąta obrotu silnika w tzw. serwomechanizmach itp. Ostatnim typem są *programowe układy regulacji*, gdzie sygnał wyjściowy zmienia się według ściśle określonej zależności wynikającej z technologii. Ten typ układów stosowany jest w obrabiarkach sterowanych numerycznie, w programowych systemach grzewczych itp.

Inny podział systemów sterowania ze względu na postać sygnałów przedstawia się następująco:

- systemy sterowania ciągłego z sygnałem o postaci analogowej, skwantowanej lub binarnej,
- systemy sterowania cyfrowego z sygnałem próbkowanym (dyskretnym),
- systemy sterowania impulsowego (o pracy przerywanej (ang. on-off control)).

Systemy sterowania impulsowego charakteryzują się tym, że sygnał wyjściowy z regulatora lub elementu wykonawczego działa na obiekt pełną wartością sygnału tylko w pewnych przedziałach czasu, po których przyjmuje wartość zerową. Układy te stosuje się często w procesach wolnozmiennych np. chemicznych, grzewczych, ziębniczych.



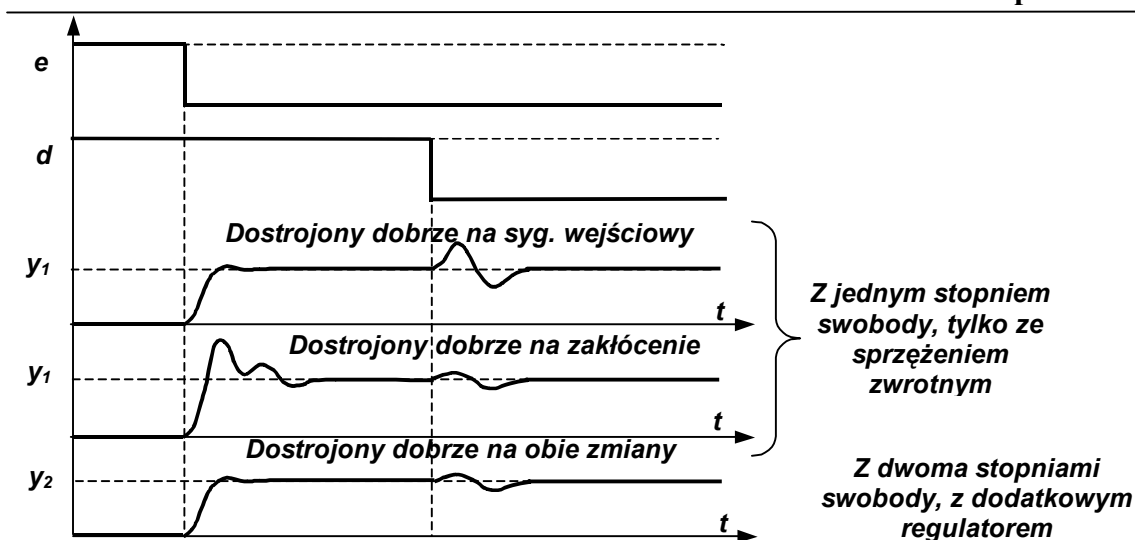
Rys. 1.1. Układ sterowania a) otwarty b) zamknięty

W układzie regulacji stałowartościowej (układzie stabilizacji) celem jest utrzymanie wartości wyjściowej y na stałym poziomie, zadanym na wejściu jako y_0 bez względu na oddziaływujące zakłócenia. Porównując wartość zadaną y_0 z aktualną wartością wielkości regulowanej y , za węzłem sumacyjnym (ang. summing junction) reprezentowanym na rysunku 1b) w postaci kółka, otrzymujemy tzw. *uchyb regulacji* (ang. error) $e = y_0 - y$. W przypadku uchybu dodatniego $e > 0$, tzn. $y_0 > y$, tak zmienimy położenia elementu sterującego, aby wywołać zwiększenie sygnału wyjściowego y . Natomiast w przypadku wystąpienia uchybu ujemnego $e < 0$, tzn. $y_0 < y$, wywołamy zmniejszenie y . Zmiana położenie elementu sterującego polega np. w układach elektrycznych na zmianie kąta wysterowania napędu tyrystorowego zasilającego silnik, w układzie hydraulicznym będzie to zmiana wychylenia wirnika w pompie co spowoduje zmianę jej wydajności. Jak widać wartość uchybu regulacji jest podstawową miarą jakości układu regulacji, a głównym zadaniem w idealnym układzie regulacji jest **utrzymanie uchybu na poziomie bliskim zeru**. Realizacja powyższego zadania umożliwi nam w układach regulacji:

- ograniczenie wpływu zakłóceń na obiekt,
- ograniczenie wpływu zmienności parametrów obiektu,
- kształtowanie charakterystyki dynamicznej obiektu (poprawienie jego właściwości).
- oraz w zależności od typu układu: stabilizację sygnału wyjściowego (w układach stałowartościowych), nadążanie wielkości wyjściowej za wejściową (w układach nadążnych) i zmianę sygnału wyjściowego według zadanego programu (w układach programowych).

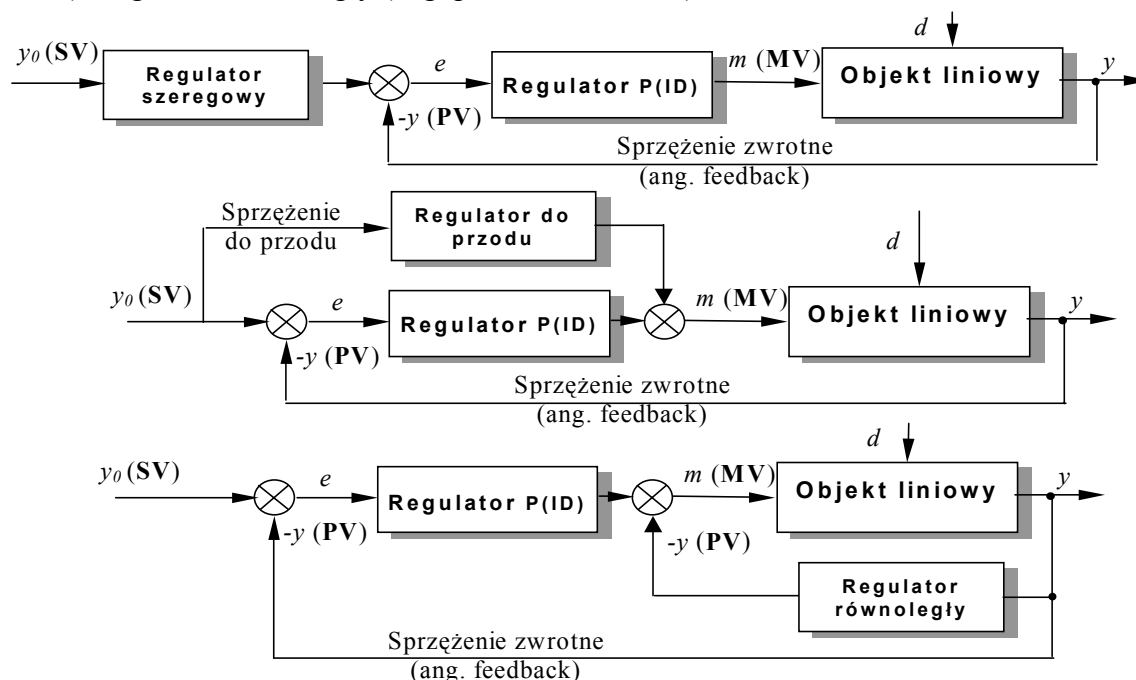
Jeżeli wpływ zakłóceń jest znaczny a układ regulacji nie jest w stanie zapewnić narzuconej miary jakości regulacji (spełnić kryterium jakości regulacji) to wtedy stosujemy *układ ze sprzężeniem do przodu* niefortunnie nazywanym w naszej literaturze *układem kompensacji* (ang. feed-forward control). Działanie jego opiera się o pomiar zakłócenia w sposób bezpośredni, jeżeli jest ono pomiarowo dostępne lub w sposób pośredni (fragment kompensacyjny na rysunku 1.1 narysowano linią kropkową).

Jeżeli poprawiamy odpowiedź na zmianę sygnału wejściowego (SV) to pogarsza się odpowiedź na zmianę zakłócenia d i odwrotnie poprawiamy na zakłócenie pogarsza się na sygnał wejściowy. Podobnie jest ze stabilnością a wpływem na zmienność parametrów.

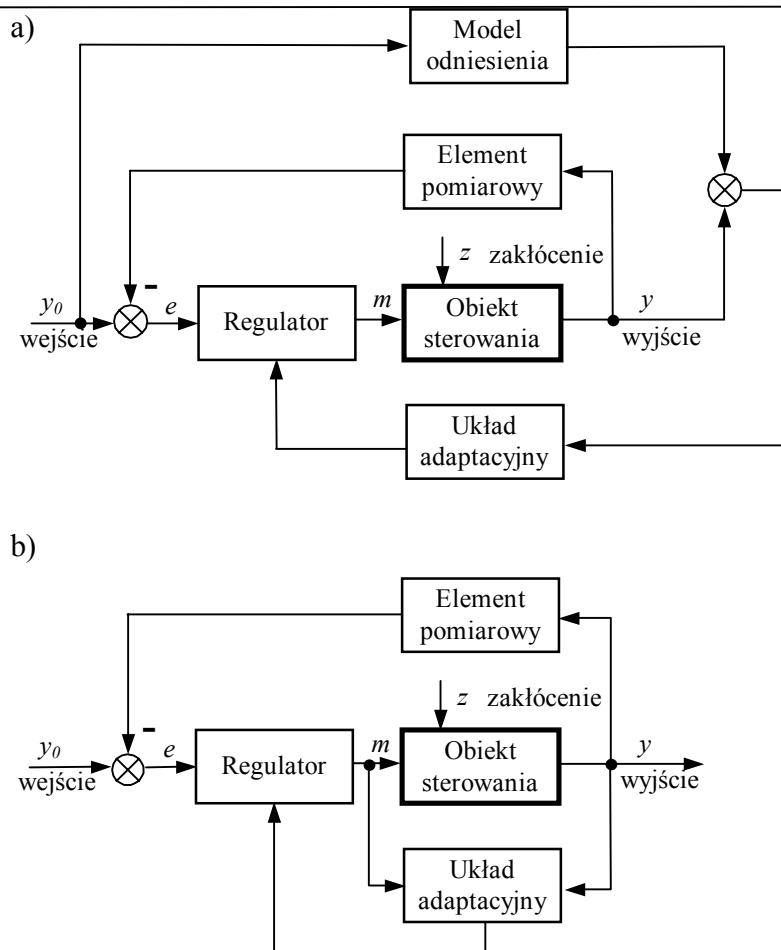


Aby pozbyć się powyższej wady, stosujemy układy o dwóch stopniach swobody (ang. two degrees of freedom) co umożliwia dodatkowo:

- szeregowy regulator (filtr wejściowy) (ang. series controller),
- regulator do przodu (ang. feedforward controller) tu po raz drugi mamy sprzężenie do przodu,
- regulator równoległy (ang. parallel controller).



Jeżeli wpływ zmienności parametrów obiektu jest znaczny lub/i obiekt jest nieliniowy a układ regulacji nie jest w stanie zapewnić narzuconej miary jakości regulacji, co w praktyce sprowadza się do tego, że układ poprawnie pracuje tylko w pobliżu określonego punktu pracy, to wtedy stosujemy *układ adaptacyjny*. Historycznie dzielimy je na układy z modelem odniesienia (rys. 1.2a) i układy z regulatorem o samonastrajających się parametrach (rys. 1.2b). Aczkolwiek można udowodnić, że regulator z modelem odniesienia jest szczególnym przypadkiem regulatora o samonastrajających się parametrach. Działanie ich polega na tym, że w trakcie eksploatacji obiekt jest identyfikowany na bieżąco tzn. określone są jego parametry, następnie w oparciu o otrzymane dane określone są nowe nastawy regulatora.



Rys. 1.2. Układy sterowania adaptacyjne: a) z modelem odniesienia b) z samonastrajaniem

1.2. Regulatory

Najważniejszym elementem w systemie regulacji jest regulator (ang. compensator – zrealizowany przy użyciu elementów biernych (rezystor, kondensator i indukcyjność), ang. controller - zrealizowany przy użyciu elementów czynnych (wzmacniacz operacyjny, procesor)). W nim dokonuje się przetwarzanie sygnału a od doboru jego struktury i parametrów zależy jakość sterowania. Pełna struktura regulatora zawiera człon proporcjonalny P i jego parametr K_r , człon całkujący I i jego parametr T_i oraz człon różniczkujący D i jego parametr T_d . Może on pracować ze sprzężeniem zwrotnym lub sprzężeniem od zakłócenia

Często regulatory specjalizowane przyjmują nazwę od rodzaju regulowanej wielkości, zastosowanego czujnika lub charakterystycznych elementów konstrukcyjnych np. termoregulator, regulator pływakowy itp.

Zastosowanie tylko członu proporcjonalnego (regulatora P) powoduje, że w momencie gdy wartość zadana y_0 zrówna się z wartością mierzoną v to uchyb regulacji staje się równy zero i regulator nic by nie wysterował. Dlatego w układzie regulacji z regulatorem proporcjonalnym P. mamy zawsze do czynienia z tzw. uchybem ustalonym e_{ust} , którego wartość jest tym mniejsza im większe jest wzmocnienie regulatora K_r .

Zastosowanie członu całkującego (regulator PI, PID) powoduje, że regulator dopóty zmienia swój sygnał wyjściowy y , dopóki nie zrówna się on z wartością zadaną y_0 . Szybkość tych zmian określona jest przez czas zdwojenia T_i . W momencie zrównania sygnał uchybu e staje się równy zero i napięcie wyjściowe z regulatora przestaje się

1. Wprowadzenie

zmieniać, zachowując ostatnią wartość. Regulator ten likwiduje uchyb ustalony (ang. steady-state error). Zastosowanie tego regulatora prowadzi do powstawania w sygnale wyjściowym przeregulowań (ang. overshoot) tzn. sygnał wyjściowy przez krótki okres czasu przewyższa wartość ustaloną.

Zastosowanie członu różniczkującego, (regulator PD, PID) przyspiesza czas narastania sygnału wyjściowego w stanach przejściowych.

Ogólna postać równania różniczkowego opisującego trójczłonowy regulator PID jest następująca:

$$m(t) = k_c \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

gdzie: $e = y_0 - y$

y - mierzona zmienna,

y_0 - wartość zadana,

e - uchyb,

k_c - wzmacnienie sterownika,

T_i - czas działania całkowania, czas zdwojenia,

T_d - czas działania różniczkowania, czas wyprzedzenia.

Często $\frac{de}{dt}$ jest zastępowane przez $\frac{dy}{dt}$ aby uniknąć różniczkowania wartości zadanej.

Jeżeli okres próbkowania wynosi T sekund to proste aproksymacje:

$$\frac{de}{dt} = \frac{(e_k - e_{k-1})}{T} \quad \text{i} \quad \int edt = \sum_{k=0}^n e_k T \quad (\text{reguła prostokątów}) \quad (2)$$

dla $k = 0, 1, 2, \dots, n$ pozwalają przekształcić równanie różniczkowe (1) w różnicowe:

$$m_k = K_r \left[e_k + \frac{T}{T_i} s_k + \frac{T_d}{T} (e_k - e_{k-1}) \right] \quad (3)$$

gdzie: $s_k = s_{k-1} + e_k$ (sumowanie całkując) (4)

a podstawiając:

$$K_i = K_r \frac{T}{T_i}, \quad K_d = K_r \frac{T_d}{T} \quad (5)$$

otrzymujemy tzw. *algorytm pozycyjny*:

$$m_k = K_r e_k + K_i s_k + K_d (e_k - e_{k-1}) \quad (6)$$

Jednak w praktyce ma zastosowanie *algorytm prędkościowy (przyrostowy)*, który daje zmianę wartości wyjściowej dla każdej próbki. Dla postaci ciągłej równanie regulatora po różniczkowaniu w funkcji czasu przyjmuje postać, w której nie występuje całkowanie:

$$\frac{dm(t)}{dt} = K_r \frac{de(t)}{dt} + K_i e(t) + K_d \frac{d^2 e(t)}{dt^2} \quad (7)$$

Równanie różnicowe można uzyskać przez zastosowanie w powyższym równaniu wstecznych różnic (ang. backward differences) lub określając $m_n - m_{n-1}$ z równania (6), co daje:

$$\Delta m_n = m_n - m_{n-1} = K_r \left[(e_n - e_{n-1}) + \frac{T}{T_i} e_n + \frac{T_d}{T} (e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}) \right] \quad (8)$$

podstawiając:

$$K_1 = K_r \left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right)$$

$$K_2 = -K_r \left(1 + 2 \frac{T_d}{T} \right)$$

$$K_3 = K_r \frac{T_d}{T}$$

Równanie (8) jako *algorytm prędkościowy* przyjmuje postać:

$$\Delta m_n = K_1 e_n + K_2 e_{n-1} + K_3 e_{n-2} \quad \text{lub}$$

$$m_n = m_{n-1} + K_1 e_n + K_2 e_{n-1} + K_3 e_{n-2} \quad (9)$$

W rozwiązaniach praktycznych parametr k_c jest często dostrajany, dlatego stosuje się też wersje powyższego równania, które przyjmują następującą postać:

$$m_n = m_{n-1} + K_r (K_1^* e_n + K_2^* e_{n-1} + K_3^* e_{n-2}) \quad (10)$$

gdzie: K_1^* , K_2^* , K_3^* są współczynnikami K_1 , K_2 , K_3 bez K_r .

Ten algorytm daje automatycznie łagodne przejścia, jednak jeżeli istnieje duży stały uchyb podczas zmiany, odpowiedź sterownika może być bardzo wolna, szczególnie jeżeli stała czasowa całkowania T_i jest duża.

Porównując algorytm pozycyjny z prędkościowym można zauważyć, że ten drugi jest łatwiejszy do programowania, jednak wymaga aby obiekt był całkujący.

Podczas skokowej zmiany wartości zadanej człon różniczkujący powoduje gwałtowny skok sygnału wyjściowego. Celem ograniczenia tego skoku w algorytmie prędkościowym (9) robimy podstawienie:

$$e_n = y_0 - x_n, \quad e_{n-1} = y_0 - x_{n-1}, \quad e_{n-2} = y_0 - x_{n-2} \quad (11)$$

gdzie: y_0 - wartość zadana,

x_n - sygnał wchodzący do węzła sumacyjnego czyli sygnał v po przejściu przez filtr cyfrowy,

stąd:

$$\Delta m_n = K_r \left[(x_{n-1} - x_n) + \frac{T}{T_i} (y_0 - x_n) + \frac{T_d}{T} (2x_{n-1} - x_{n-2} - x_n) \right] \quad (12)$$

Wartość zadana występuje tylko w członie całkującym, dlatego regulator musi zawsze zawierać człon całkujący.

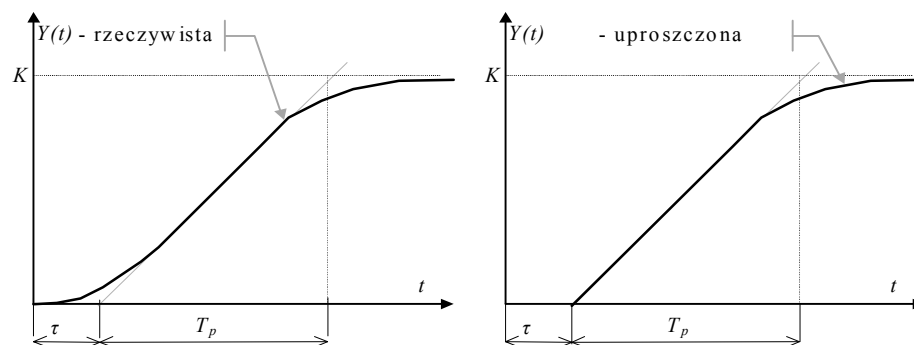
Wśród wielu metod suboptymalnych doboru parametrów regulatora największe praktyczne znaczenie ma metoda Zieglera i Nicholasa. Polega ona na tym, że obiekt sterowany jest przez regulator nastawiony na działanie proporcjonalne (P), ostrożnie zwiększając współczynnik wzmocnienia aż do wartości K_{rgr} dochodzimy do granicy stabilności (wystąpią wtedy oscylacje o okresie T_0), stąd otrzymujemy dla odpowiedniej struktury regulatora następujące wartości nastaw:

P	$K_r = 0.5 K_{rgr}$	
PI	$K_r = 0.45 K_{rgr}$,	$T_i = 0.83 T_0$
PID	$K_r = 0.6 K_{rgr}$,	$T_i = 0.5 T_0$, $T_d = 0.125 T_0$

(13)

Natomiast bazując na odpowiedzi obiektu na wymuszenie skokowe bez podłączonego sprzężenia zwrotnego (rys. 1.6), jeżeli istnieje taka możliwość, otrzymujemy dla odpowiedniej struktury regulatora następujące wartości nastaw:

$$\begin{array}{lll}
 \text{P} & K_r = \frac{T_p}{KK_z \tau} & \\
 \text{PI} & K_r = 0,9 \frac{T_p}{KK_z \tau} & T_i = 3,3 \tau \\
 \text{PID} & K_r = 1,2 \frac{T_p}{KK_z \tau} & T_i = 2 \tau \quad T_d = 0,5 \tau \quad (14)
 \end{array}$$



Rys. 1.6. Odpowiedź na wymuszenie skokowe

W systemach cyfrowych o doborze nastaw regulatorów obok wyżej wymienionych parametrów decyduje jeszcze liczba poziomów kwantowania q oraz czas próbkowania T .

$$I = I(q, T, K_r, K_i, K_d, T_p, \tau)$$

Podczas sterowania procesami przemysłowymi obliczenia przeprowadza się na liczbach rzeczywistych lub w arytmetyce stałoprzecinkowej z odpowiednią precyzją (długością słowa) i dobór liczby poziomów nie stwarza problemów. Jedynie w systemach np. sterowania samolotami, raketami gdzie wymagane są bardzo krótkie stałe czasowe, w celu maksymalnego skrócenia obliczeń ogranicza się długość słowa.

Intuicyjnie nasuwa się pytanie, czy czas próbkowania powinien być tak mały jak to jest tylko możliwe. Jednak przyjęcie konkretnego algorytmu PID lub podobnego powoduje, że istnieje pewien "optymalny" okres próbkowania. Jest nim wg. Goffa założenie, że:

$$T \cong 0.3 \tau$$

Ponadto wartość liczbowa wyrażenia $\frac{T_i}{T}$ powinna być z przedziału $2 \div 6$, przy czym mała wartość dla procesów o przeważającym czasie opóźnienia a duża dla procesów z małym czasem opóźnienia, a wartość liczbowa wyrażenia $\frac{T_d}{T}$ z przedziału $5 \div 10$.

Dla regulatora PID którego algorytm ma postać (12), gdzie: $K_i = K_r \frac{T}{T_i}$, $K_d = K_r \frac{T_d}{T}$ i

stosując kryterium I_2 , Tokahashi podał przy założeniu że $\frac{\tau}{T} \geq 0,5$ następujące reguły doboru parametrów regulatora, w których uwzględniono okres próbkowania, określane z odpowiedzi na wymuszenie skokowe w układzie otwartym:

$$K_r = \frac{1,2T_p}{K_z K(\tau+T)} - 0,5K_i,$$

$$K_i = \frac{0,6TT_p}{K_z K(\tau+0,5T)^2},$$

$$K_d = \frac{0,5T_p}{K_z KT} \text{ lub } \frac{0,6T_p}{K_z KT} \text{ gdy } \frac{\tau}{T} \text{ jest liczbą całkowitą.} \quad (15)$$

Po podstawieniu $T = 0$ powyższe reguły są zgodne z wcześniej przytoczonymi regułami Zieglera-Nicholsa. Należy przypomnieć, że z kryteriów całkowych wywodzą się dwa znane kryteria Kesslera: optimum modułowego (OM) oraz optimum symetrycznego (OS), szczegółowo opisane w literaturze.

1.3. Ocena układu regulacji

Jakość układu regulacji można określić z:

- stabilności (kryteria stabilności),
- dobroci (wskaźniki dobroci),
- wrażliwości (wskaźniki wrażliwości),
- wskaźników jakości.

Do oceny układu regulacji oraz do doboru regulatorów stosuje się następujące wskaźniki jakości (ang. performance indices, criterions):

a) *wskaźniki liczbowe* określane bezpośrednio z odpowiedzi układu lub uchybu na wymuszenie standardowe (skokowe, impulsowe), z charakterystyk częstotliwościowych i z T rozkładu pierwiastków. Przykładowo najważniejszymi wskaźnikami określanymi z odpowiedzi na wymuszenie skokowe są: podstawowa stała czasowa T_p , zwłoka czasowa τ (rys. 1.6) a dla obiektów oscylacyjnych przeregulowanie, czyli pierwsza amplituda odniesiona do wartości ustalonej i wyrażona w procentach.

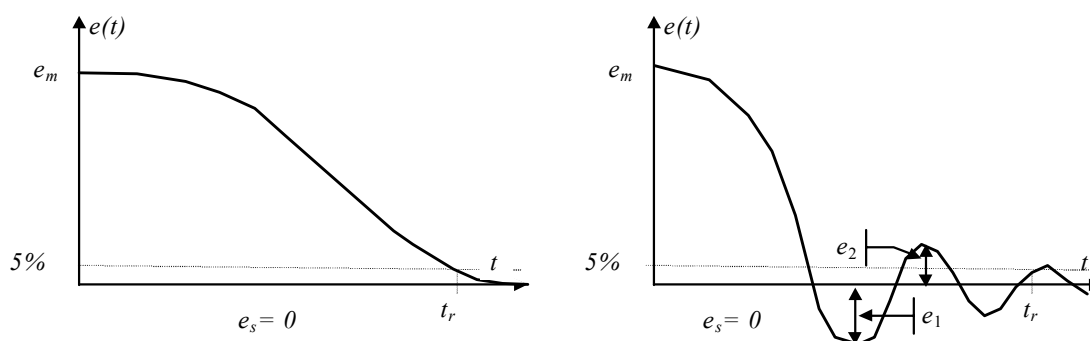
Z kolei dla przebiegu uchybu dla obiektu nieoscylacyjnego i oscylacyjnego najważniejszymi wskaźnikami są (rys 1.7):

- maksymalny uchyb dynamiczny $e_m = \max[e(t)]$

- uchyb ustalony $e_s = e(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t)$

- oscylacyjność $d = 100 \frac{e_2}{e_1} [\%]$

- czas regulacji t_r (ang. settling time) dla odchylenia np. $\pm(2 - 5)\%e_s$



Rys. 1.7 Przebieg uchybu dla obiektu nieoscylacyjnego i oscylacyjnego

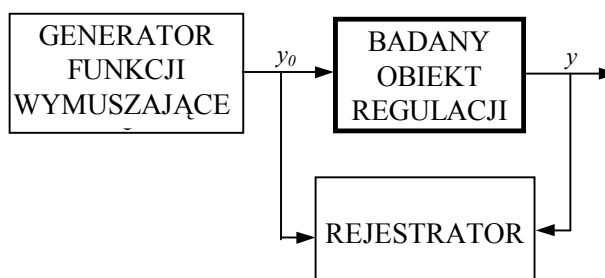
1. Wprowadzenie

b) *wskaźniki całkowe* (ang. integral criteria) dają ocenę jedynie stanów nieustalonych w układzie i na ich podstawie nic nie można wnioskować na temat uchybu statycznego. Najczęściej stosowanymi postaciami wskaźników całkowych są:

$$I_1 = \int_0^{\infty} e(t) dt, \quad I_{1r} = \int_0^{\infty} t e(t) dt, \quad I_{1m} = \int_0^{\infty} |e(t)| dt, \quad I_{1rm} = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt, \quad I_{1r2m} = \int_0^{\infty} t^2 |e(t)| dt, \quad I_2 = \int_0^{\infty} e^2(t) dt,$$

$$I_{\lambda} = \int_0^{\infty} [e^2 + \lambda e'^2] dt \quad \text{gdzie } \lambda \text{ przyjmujemy z przedziału } 1.22 \div 1.56.$$

Określenie wskaźnika liczbowego lub całkowego umożliwi ocenić układ regulacji. Im wartość wskaźnika mniejsza tym układ lepszy. Do pomiaru wykorzystujemy karty pomiarowe lub oscyloskop z pamięcią wg schematu zamieszczonego na rysunku 1.8.



Rys. 1.8. Schemat blokowy układu badawczego

W generatorze funkcji wymuszającej stosujemy funkcję skokową do charakterystyk czasowych lub przestrajalny generator napięcia sinusoidalnego do charakterystyk częstotliwościowych.