

## 4. MATERIAŁ NAUCZANIA

### 4.1. Regulatory P, PI, PID – funkcje, budowa, działanie, zastosowanie

#### 4.1.1. Materiał nauczania

##### Podstawowe pojęcia z automatyki

Obiektem nazywamy urządzenie, albo zespół urządzeń, w których przebiega wybrany proces technologiczny, powodujący określone zmiany fizyczne lub chemiczne materii, przemiany energii. Obiektami są także urządzenia służące do przesyłania materii i energii oraz przetwarzania i przesyłania informacji.

Sterowanie jest to oddziaływanie na określony obiekt sterowania (proces sterowania) w celu osiągnięciażądanego zachowania się, zgodnego z zadanym sterowaniem. Wielkości fizyczne, za pomocą których otoczenie oddziałuje na obiekt, nazywamy wielkościami wejściowymi obiektu. Wielkości, za pomocą których obiekt oddziałuje na otoczenie, nazywamy wielkościami wyjściowymi. Wielkości powodujące nie zamierzone, przypadkowe oddziaływanie otoczenia na obiekt, nazywamy wielkościami zakłócającymi.

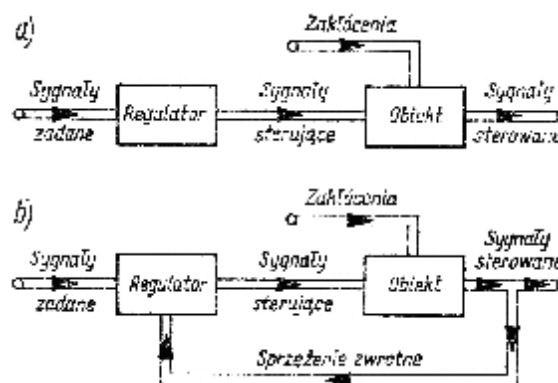
Sygnaly wyjściowe obiektu sterowania są zwane sygnalami sterowanymi, a sygnaly wejściowe to sygnaly sterujące – realizujące sterowanie obiektu oraz zakłócenia – wszelkie inne oddziaływania, utrudniające realizację zadania sterowania. Ze względu na ilość wejść i wyjść obiekty możemy podzielić na: jednowejsciowe i jednowyjsciowe oraz wielowejsciowe i wielowyjsciowe (rys. 1).



Rys. 1. Obiekt sterowania: a) o jednym sygnale wejściowym i wyjściowym, b) o wielu sygnal wejściowych i wyjściowych [6, s. 6]

Zadanie sterowania ma zazwyczaj postać żadanego przebiegu sygnalów sterowanych i jest wówczas zwane sygnalem zadanym.

Układ dokonujący sterowania – wytwarzający sygnaly sterujące – jest zwany urządzeniem sterującym. Sygnalem wejściowym urządzenia sterującego jest informacja o zadaniu sterowania. Urządzenie sterujące i obiekt stanowią układ sterowania, który może być otwarty lub zamknięty (rys. 2).

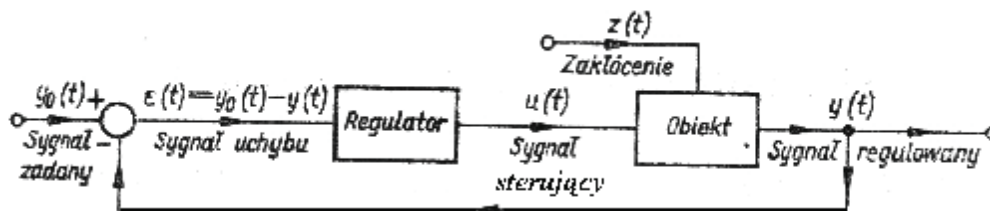


Rys. 2. Układy sterowania: a) otwarty, b) zamknięty [2, s. 75]

W otwartym układzie sterowania urządzenie sterujące nie otrzymuje zwrotnej informacji o aktualnej wartości sygnału sterowanego, natomiast w układzie zamkniętym, ze sprzężeniem zwrotnym, otrzymuje ją, przy czym informacja ta wpływa na przebieg sterowania. Sterowanie w układzie zamkniętym nazywa się regulacją. Odpowiednio zaś: układ sterowania – układem regulacji, obiekt sterowania – obiektem regulacji, urządzenie sterujące – urządzeniem regulującym (regulatorem), sygnał sterowany – sygnałem regulowanym. Sygnał oddziaływania regulatora na obiekt jest dalej nazywany sygnałem sterującym.

W układzie regulacji sygnał regulowany jest wprowadzany do regulatora przez tzw. ujemne sprzężenie zwrotne. Takie oddziaływanie obiektu na regulator jest charakterystyczne dla wszystkich układów regulacji.

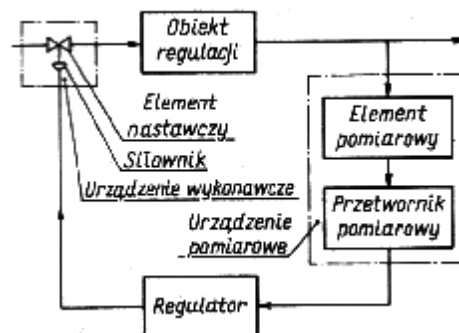
Podstawowym pojęciem z zakresu układów regulacji jest odchyłka (uchyb) regulacji, oznaczająca różnicę między pożądaną (zadaną) a rzeczywistą, aktualną wartością sygnału regulowanego. Zadaniem regulatora jest takie oddziaływanie na obiekt regulacji, aby odchyłka regulacji była bliska zera (rys. 3). Regulator podzielono na układ porównujący, który wytwarza sygnał odchyłki, oraz układ formujący, który przekształca sygnał odchyłki na sygnał sterujący. Sprzężenie zwrotne jest ujemne, co zaznaczono za pomocą znaku minus na wejściu układu porównującego.



Rys. 3. Schemat układu regulacji automatycznej jednej zmiennej [2, s. 76]

### Klasyfikacja układów regulacji

Układ automatyki powstaje z połączenia elementów i urządzeń w pewien zespół wykonujący określone zadanie (rys. 4).



Rys. 4. Schemat blokowy układu regulacji [7, s. 14]

Na schemacie blokowym widać, że do zestawienia układu potrzebne jest urządzenie pomiarowe, urządzenie wykonawcze oraz regulator.

Urządzeniami w automatyce są nazywane człony spełniające funkcje bardziej złożone. W skład urządzenia wykonawczego wchodzi element nastawczy i napędowe (siłowniki), urządzenia pomiarowe – czujniki i przetworniki pomiarowe. Do urządzeń zaliczamy także regulatory, rejestratory, zespoły zasilające, urządzenia cyfrowe. Elementami w automatyce są nazywane człony spełniające w układzie bądź urządzeniu proste funkcje, takie jak: wzmacnienie

sygnału, porównanie sygnałów, zmiana postaci sygnału. Członem więc jest: czujnik pomiarowy, element porównujący, zawór, silnik, wzmacniacz, człon dynamiczny, itp.

Układy regulacji można podzielić, jak wszystkie układy dynamiczne, na ciągłe i impulsowe, liniowe i nieliniowe.

Własności regulatora są zwykle ustalone z góry i z założenia niezmiennie w czasie. W bardziej złożonych przypadkach, gdy równania obiektu, charakter zadania sterowania lub zakłócenia zmieniają się w czasie pracy układu, może być pożądanym dopasowanie (adaptacja) równania regulatora. Układy regulacji o celowo zmieniających się równaniach regulatora są zwane układami adaptacyjnymi.

Jeżeli w czasie syntezy układu regulacji dążymy do uzyskania najlepszych wskaźników jakości, nie ograniczając struktury regulatora, to taki układ nazywamy układem optymalnym. Jeżeli typ regulatora jest z góry zadany, a synteza zapewnia najlepsze wskaźniki jakości jedynie wśród regulatorów danego typu, to taki układ nazywamy układem parametrycznie optymalnym.

Ze względu na realizowane zadania sterowania układy dzielimy na:

- układy sterowania stałowartościowego, w których sygnał zadany przybiera stałą wartość,
- układy sterowania programowego, w których sygnał zadany jest znanym z góry programem,
- układ sterowania nadążnego, w którym sygnał zadany ma charakter nieprzewidywany, przypadkowy,
- układ sterowania ekstremalnego (bez jawnie występującego sygnału zadanego), gdzie zadaniem jest utrzymanie jednego z sygnałów wyjściowych obiektu na wartości maksymalnej lub minimalnej,
- układ sterowania sekwencyjnego, w których algorytm działania jest wcześniej określony, składający się z ciągu prostych zadań realizowanych kolejno, przy czym przejście do następnego z tych zadań zależy od realizacji poprzednich zadań albo od spełnienia innych warunków.

### Matematyczny opis układu regulacji

Właściwości ciągłego elementu lub układu liniowego o parametrach stałych można opisać za pomocą równania różniczkowego, liniowego, o stałych współczynnikach i postaci ogólnej:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_0 x,$$

przy czym dla fizycznie realizowanych przypadków obowiązuje warunek  $m \leq n$ . Jest to równanie rzędu  $n$  względem wielkości wyjściowej –  $y$ , zaś  $x$  oznacza wymuszenie (wielkość wejściową),  $t$  – czas,  $a_k$  i  $b_l$  – współczynniki stałe ( $k = 0, 1, 2, \dots, n$ ;  $l = 0, 1, 2, \dots, m$ ).

Opis typu wejście – wyjście w przedstawionej powyższej postaci nie jest najczęściej zbyt wygodny. Bardzo duże uproszczenie tego opisu uzyskuje się wprowadzając pojęcie transmitancji operatorowej.

Metoda operatorowa polega na zastosowaniu przekształcenia, zwanego przekształceniem Laplace'a, które pozwala zastąpić równanie różniczkowo-całkowe zwykłym równaniem algebraicznym. Przekształcenie Laplace'a przyporządkowuje danej funkcji transformatę (obraz przekształcenia) i odwrotnie

$$f(t) \leftrightarrow F(s).$$

Założmy, że  $X(s)$  jest transformacją Laplace'a wymuszenia  $x(t)$  pojawiającego się dla  $t > 0$ , a  $Y(s)$  – transformacją szukanego sygnału wyjściowego  $y(t)$ . Wówczas powyższe równanie wejście – wyjście, w dziedzinie transformat, przy zerowych warunkach początkowych, można zapisać jako

$$(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + a_{n-2} s^{n-2} + \dots + a_1 s + a_0) Y(s) = (b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + b_{m-2} s^{m-2} + \dots + b_1 s + b_0) X(s).$$

Transmitancją operatorową nazywa się iloraz transformat wyjścia i wejścia, przy zerowych warunkach początkowych

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + b_{m-2} s^{m-2} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + a_{n-2} s^{n-2} + \dots + a_1 s + a_0},$$

przy czym  $m \leq n$ .

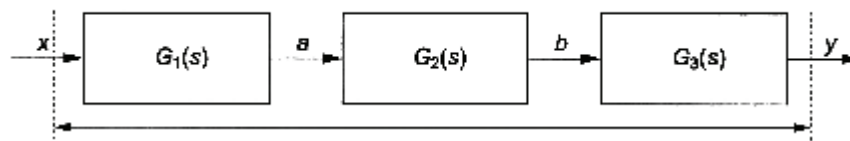
Transmitancja  $G(s)$  jest funkcją zmiennej zespolonej  $s$  i ma tę właściwość, że w wyniku pomnożenia transformaty wejścia  $X(s)$  przez transmitancję  $G(s)$  otrzymuje się transformatę wyjścia  $Y(s)$ :

$$X(s) G(s) = Y(s).$$

Ponieważ transmitancja operatorowa opisuje w sposób kompletny właściwości elementu lub układu liniowego, wpisujemy ją wewnątrz prostokąta symbolizującego dany element na schematach blokowych układów automatyki.

Transmitancje podstawowych połączeń elementów:

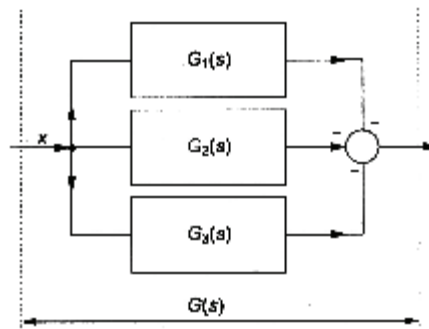
- połączenie szeregowe (rys. 5),



$$G(s) = G_1(s)G_2(s)G_3(s)$$

Rys. 5. Połączenie szeregowe 3 elementów [5, s. 60]

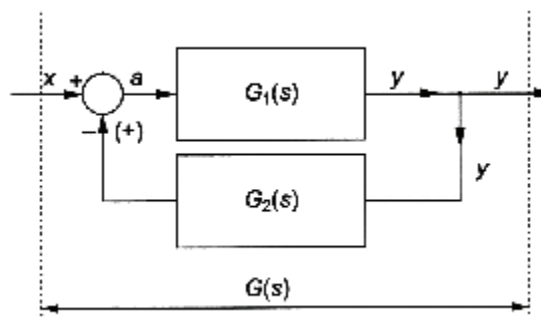
- połączenie równoległe (rys. 6),



$$G(s) = G_1(s) + G_2(s) + G_3(s)$$

Rys. 6. Połączenie równoległe 3 elementów [5, s. 61]

- połączenie ze sprzężeniem zwrotnym (rys.7).



a) dla ujemnego sprzężenia zwrotnego:

$$G(s) = \frac{G_1(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)},$$

b) dla dodatniego sprzężenia zwrotnego:

$$G(s) = \frac{G_1(s)}{1 - G_1(s)G_2(s)}.$$

Rys. 7. Połączenie ze sprzężeniem zwrotnym [5, s. 61]

## Transmitancja widmowa i charakterystyki częstotliwościowe

Transmitancja widmowa powstaje z transmitancji operatorowej  $G(s)$  przez podstawienie zamiast zmiennej  $s$  – zmiennej  $j\omega$ , przy czym  $j$  jest jednostką urojoną, zaś  $\omega$  jest liczbą rzeczywistą odpowiadającą częstotliwości kątowej. Stąd

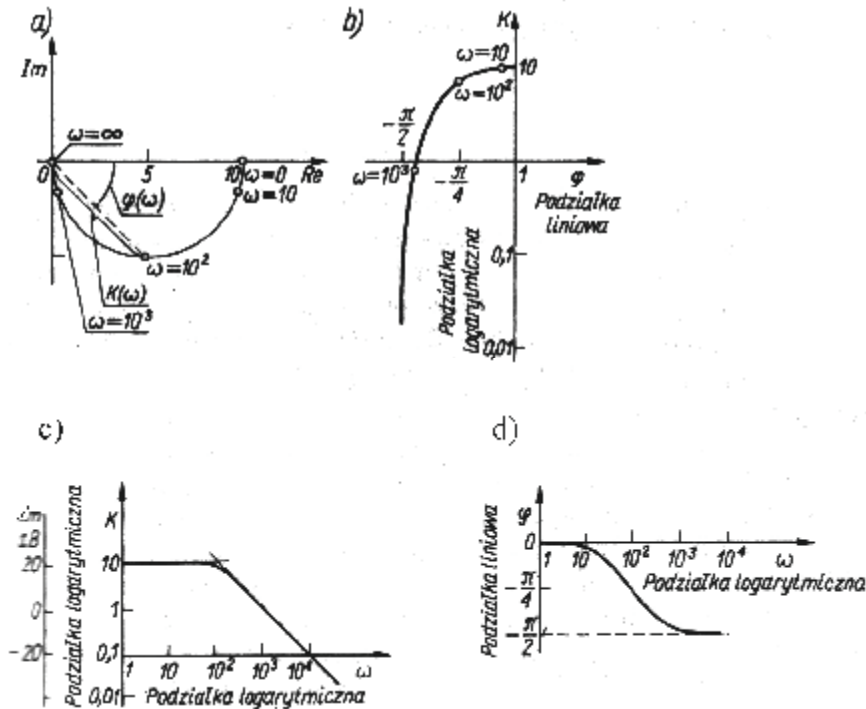
$$G(j\omega) = G(s) \Big|_{s=j\omega}$$

Transmitancję widmowa można przedstawić w postaci  $G(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$ . Odpowiada to sytuacji, w której jeśli przebieg wymuszenia ma postać  $x(t) = \sin\omega t$ , to przebieg odpowiedzi ma postać  $y(t) = A(\omega) \sin[\omega t + \varphi(\omega)]$ . Moduł transmitancji widmowej  $A(\omega)$  określa wzmocnienie (stosunek amplitud) sygnałów harmonicznym  $y(t)$  i  $x(t)$ , a argument (kąt fazowy) transmitancji widmowej  $\varphi(\omega)$  – przesunięcie fazowe sygnału  $y(t)$  względem  $x(t)$ .

Charakterystyki częstotliwościowe otrzymuje się na podstawie transmitancji widmowej, jeśli  $\omega$  potraktuje się jako zmienną niezależną, przebiegającą od wartości 0 do  $+\infty$ .

Rozróżnia się następujące charakterystyki częstotliwościowe (rys.8):

- charakterystykę amplitudowo-fazową  $G(j\omega)$ ,
- charakterystykę amplitudową  $A(\omega) = |G(j\omega)|$ ,
- charakterystykę fazową  $\varphi(\omega) = \arg G(j\omega)$ ,
- charakterystyki logarytmiczne - amplitudowa i fazowa.



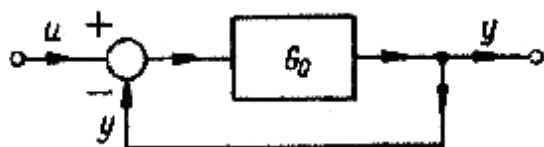
Rys. 8. Charakterystyki częstotliwościowe: a) charakterystyka amplitudowo-fazowa; b) charakterystyka amplitudowo-fazowa w układzie współrzędnych prostokątnych; charakterystyki logarytmiczne –c) amplitudowa i d) fazowa [9, s. 33]

## Stabilność układu regulacji

Układ regulacji musi być stabilny. Stabilność układu oznacza, że po wytrąceniu go ze stanu normalnego działania układ sam powraca do tego stanu. Układ niestabilny nie nadaje się do zastosowań praktycznych, gdyż nie jest w stanie zrealizować zadania sterowania, może także spowodować uszkodzenie obiektu regulacji.

Jedną z najbardziej znanych metod sprawdzania stabilności układów jest tzw. kryterium Nyquista. Kryterium to należy do grupy kryteriów częstotliwościowych, opartych na charakterystykach częstotliwościowych układów. Kryterium to dotyczy ważnego przypadku

badania stabilności układu zamkniętego (rys. 9) na podstawie charakterystyki  $G_o(j\omega)$  układu otwartego.



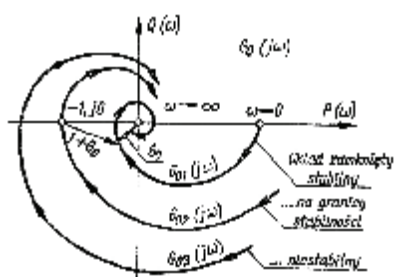
Transmitancję  $G$  takiego układu wyraża wzór

$$G = \frac{G_o}{1 + G_o}$$

przy czym  $G_o$  – transmitancja układu otwartego.

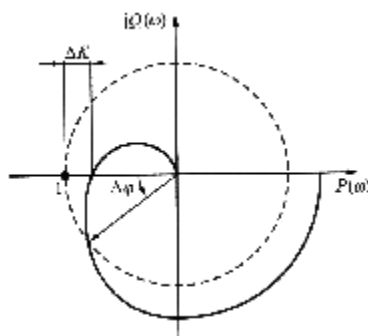
Rys. 9. Układ regulacji [2, s. 49]

Warunek kryterium Nyquista można sformułować następująco: Układ zamkniętej regulacji jest stabilny, jeżeli charakterystyka amplitudowo-fazowa  $G_o(j\omega)$  układu otwartego nie obejmuje punktu  $(-1, j0)$  przy zmianie częstotliwości od 0 do  $\infty$  (rys.10).



Rys. 10. Kryterium Nyquista [2, s. 64]

Poza sprawdzeniem warunku stabilności na wykresie amplitudowo-fazowym sprawdza się także zapas fazy ( $\Delta\phi$ ) i zapas wzmocnienia ( $\Delta K$ ) dla charakterystycznych punktów, odpowiadających przecięciu przez wykres koła o promieniu jednostkowym i przecięciu osi rzeczywistej w obszarze objętym przez to koło (rys.11).



Rys. 11. Określenie zapasów modułu i fazy [1, s. 31]

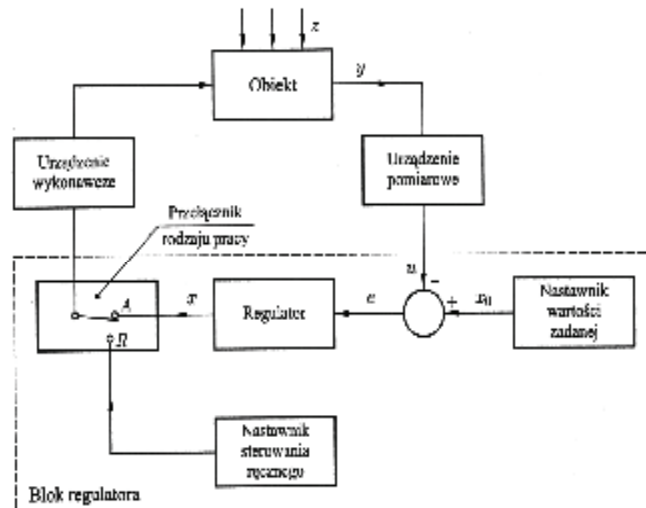
Korekta przebiegu częstotliwościowej charakterystyki amplitudowo-fazowej układu otwartego jest dokonywana przy zastosowaniu regulatora o odpowiednio dobranej transmitancji. Najczęściej stosuje się regulatory typu: proporcjonalnego (P), całkującego (I), proporcjonalno-całkującego (PI), proporcjonalno-różniczkującego (PD) oraz proporcjonalno-całkująco-różniczkującego (PID).

Stosowanie w torze sterowania regulatora ma na celu nie tylko uzyskanie stabilnej pracy układu regulacji, ale również odpowiedniej jakości przebiegu wielkości regulowanej oraz kompensacji zakłóceń.



## Regulatory

Regulator to urządzenie, którego zadaniem w układzie regulacji jest wyznaczenie uchybu regulacji ( $\varepsilon$ ) oraz ukształtowanie sygnału wyjściowego ( $u$ ) o wartości zależnej od wartości uchybu regulacji, czasu występowania uchybu i szybkości jego zmian, a także zapewnienie sygnałowi wyjściowemu postaci i mocy potrzebnej do uruchomienia urządzeń wykonawczych (rys.12).



Rys. 12. Schemat zamkniętego układu regulacji [6, s. 38]

Regulator spełnia w układzie jeszcze inne funkcje, jeżeli w swojej strukturze zawiera dodatkowe urządzenia:

- nastawnik wartości zadanej (zadajnik),
- przełącznik rodzaju pracy regulatora,
- nastawnik sterowania ręcznego,
- mierniki mierzące wartość wielkości istotnych dla procesu regulacji (wartości zadanej, wartości uchybu, wartości sygnału wyjściowego regulatora).

Ustawienie przełącznika rodzaju pracy w pozycji R (sterowanie ręczne) umożliwia oddziaływanie na obiekt regulacji z nastawnika sterowania ręcznego (regulator zostaje odłączony od układu, a sam układ stał się otwartym układem sterowania). Przy przełączeniu przełącznika rodzaju pracy w pozycję A (sterowanie automatyczne), sterowanie odbywa się w układzie zamkniętym. Często regulatory są wykonywane w postaci dwóch konstrukcyjnie rozdzielonych urządzeń: regulatora i stajki manipulacyjnej, w której umieszczone są zadajnik, przełącznik rodzaju pracy, nastawnik sterowania ręcznego oraz mierniki.

Regulatory, ze względu na dostarczaną energię, możemy podzielić na:

- regulatory bezpośredniego działania – nie korzystają z energii pomocniczej,
- regulatory pośredniego działania – korzystają ze źródła energii pomocniczej:
  - pneumatyczne,
  - hydrauliczne,
  - elektryczne.

Regulatory możemy podzielić także ze względu na rodzaj sygnału wyjściowego na:

- analogowe, gdzie sygnał wyjściowy ma postać ciągłą – regulatory typu P, I, PI, PD, PID,
- dyskretne, gdzie sygnał wyjściowy ma postać nieciągłą – regulatory dwustawne, trójstawne, krokowe, impulsowe, cyfrowe.

Ze względu na przeznaczenie regulatory mogą być:

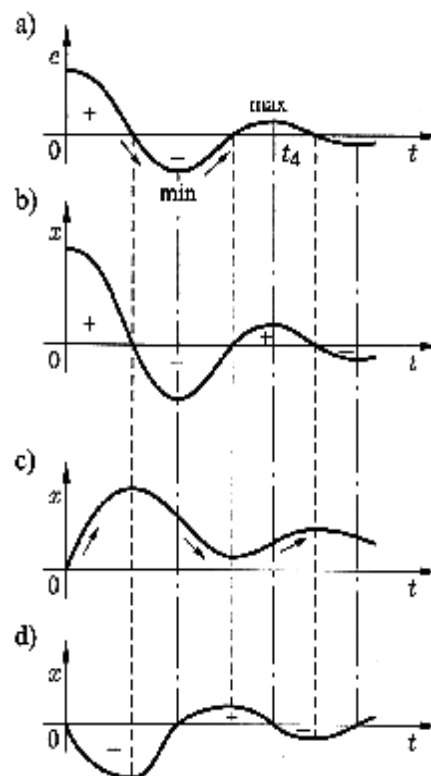
- uniwersalne,
- specjalizowane (przeznaczone do regulacji jednej wielkości).

## Regulatory analogowe – właściwości dynamiczne, charakterystyki

W regulatorach analogowych występują następujące człony dynamiczne formujące sygnał sterujący regulatora:

- człon proporcjonalny,
- człon różniczkujący,
- człon całkujący.

Działanie tych członów przedstawiają przebiegi ich sygnału wyjściowego w zależności od przebiegu sygnału wejściowego (rys. 13). Człon proporcjonalny wzmacnia sygnał wejściowy. Sygnał wyjściowy członu całkującego narasta - gdy sygnał wejściowy jest dodatni, a maleje – gdy sygnał wejściowy jest ujemny (człon całkujący reaguje na znak sygnału wejściowego). Sygnał wyjściowy członu różniczkującego jest dodatni – gdy sygnał wejściowy narasta, jest ujemny – gdy maleje (człon różniczkujący reaguje na monotoniczność przebiegu sygnału wejściowego).



**Rys. 13.** Działanie członów formujących sygnał sterujący regulatora:  
a) przebieg sygnału wejściowego, b) odpowiadający mu przebieg sygnału wyjściowego członu proporcjonalnego, c) członu całkującego, d) członu różniczkującego [6, s. 39]

Ze względu na rodzaj stosowanych członów formujących sygnał sterujący wyróżniamy następujące typy regulatorów:

- regulator typu P, realizujący działanie proporcjonalne,
- regulator typu I, realizujący działanie całkujące,
- regulator typu PI, realizujący działanie proporcjonalno-całkujące,
- regulator typu PD, realizujący działanie proporcjonalno-różniczkujące,
- regulator typu PID, realizujący działanie proporcjonalno-całkująco-różniczkujące.

Regulator proporcjonalny P charakteryzuje się tym, że wartość sygnału wyjściowego regulatora jest proporcjonalna do wartości uchybu regulacji. Parametrem nastawialnym regulatora jest wzmacnienie  $K_p$ . Zamiast wzmacnienia  $K_p$  często używa się jego odwrotność

$x_p = \frac{1}{K_p} 100\%$ , zwaną zakresem proporcjonalności i wyrażoną w procentach. Zakres

proporcjonalności jest to przyrost sygnału wejściowego niezbędny do uzyskania pełnego zakresu zmian sygnału wyjściowego.

Regulator całkujący I charakteryzuje się tym, że prędkość zmian sygnału wyjściowego jest proporcjonalna do wartości uchybu regulacji. Parametrem charakterystycznym regulatora całkującego jest czas całkowania  $T_i$  określony jako czas po którym sygnał wyjściowy po skokowej zmianie uchybu regulacji osiągnie wartość równą wartości skoku.



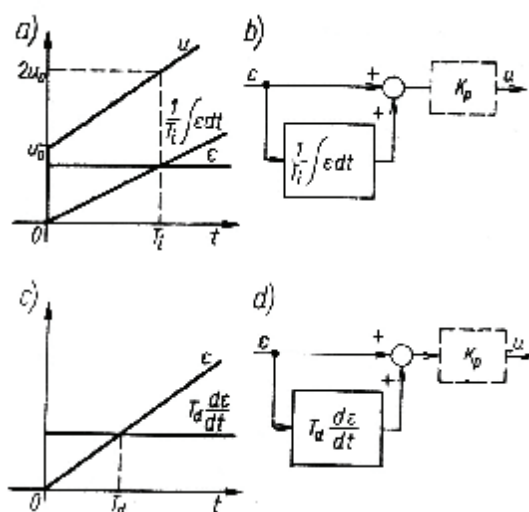
Regulator proporcjonalno-całkujący PI charakteryzuje się tym, że sygnał wyjściowy jest sumą działania proporcjonalnego i całkującego. Regulator ma dwa parametry nastawialne: wzmocnienie  $K_p$  czas całkowania  $T_i$ .

Parametr  $T_i$  określa „intensywność” działania całkującego i często jest nazywany czasem zdwojenia. Jest on równy czasowi, po jakim odpowiedź członu całkującego na skokową zmianę sygnału  $\varepsilon$  od wartości zerowej staje się równa sygnałowi  $\varepsilon$ , a tym samym sygnał wyjściowy regulatora PI lub PID osiąga podwójną wartość działania proporcjonalnego.

Regulator proporcjonalno-różniczkujący PD powstaje przez dodanie do działania proporcjonalnego działania różniczkującego. Działanie różniczkujące regulatora polega na tym, że wartość sygnału wyjściowego jest proporcjonalna do prędkości zmian uchybu regulacji. Parametrem charakterystycznym regulatora jest czas różniczkowania  $T_d$ .

Parametr  $T_d$  określający proporcję, z jaką uwzględnia się działanie różniczkujące w regulatorze nazywany jest czasem wyprzedzania. Jest on równy czasowi, po jakim liniowo narastający sygnał  $\varepsilon(t) = at$  będzie równy sygnałowi wyjściowemu członu różniczkującego

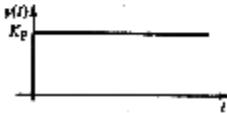
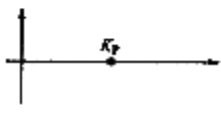
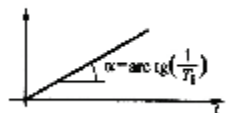

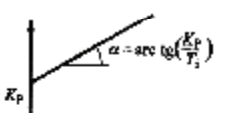
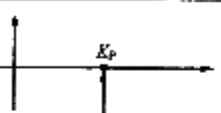
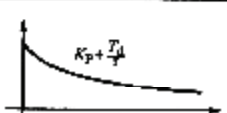
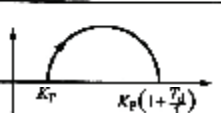
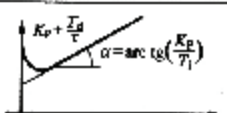
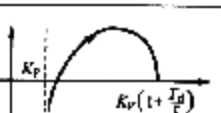
$$T_d = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (\text{rys.14}).$$



**Rys. 14.** Interpretacja graficzna czasu: a) zdwojenia w regulatorze PI, b) wyprzedzania w regulatorze PD [9, s. 82]

Transmitancje operatorowe, charakterystyki czasowe i amplitudowo-fazowe podstawowych regulatorów przedstawia tabela 1.

Tabela 1. Podstawowe typy regulatorów przemysłowych [1, s. 34]

Typ regulatora	Transmitancja operatorowa $G(s)$	Odpowiedź na skok jednostkowy	Charakterystyka amplitudowo-fazowa $G(j\omega)$
Proporcjonalny P	$K_P$		
Całkujący I	$\frac{1}{sT_i}$		
Proporcjonalno-całkujący PI	$K_P \left(1 + \frac{1}{sT_i}\right)$		
Proporcjonalno-różniczkujący PD	$K_P \left(1 + sT_d\right)$		
Proporcjonalno-całkująco-różniczkujący PID	$K_P \left(1 + \frac{1}{sT_i} + \frac{sT_d}{sT+1}\right)$		

Działanie układów regulacji z przedstawionymi w tabeli 1 regulatorami zależy od doboru parametrów (nastaw) tych regulatorów.

W produkowanych regulatorach uniwersalnych stosowane są najczęściej następujące zakresy zmian poszczególnych parametrów:

- zakres proporcjonalności  $x_p$  w granicach 3 ÷ 400%
- czas zdwojenia  $T_i$  w granicach 3 s ÷ 30 min,
- czas wyprzedzania  $T_d$  w granicach 0 ÷ 15 min.

#### 4.1.2. Pytania sprawdzające

Odpowiadając na pytania, sprawdzisz, czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczeń.

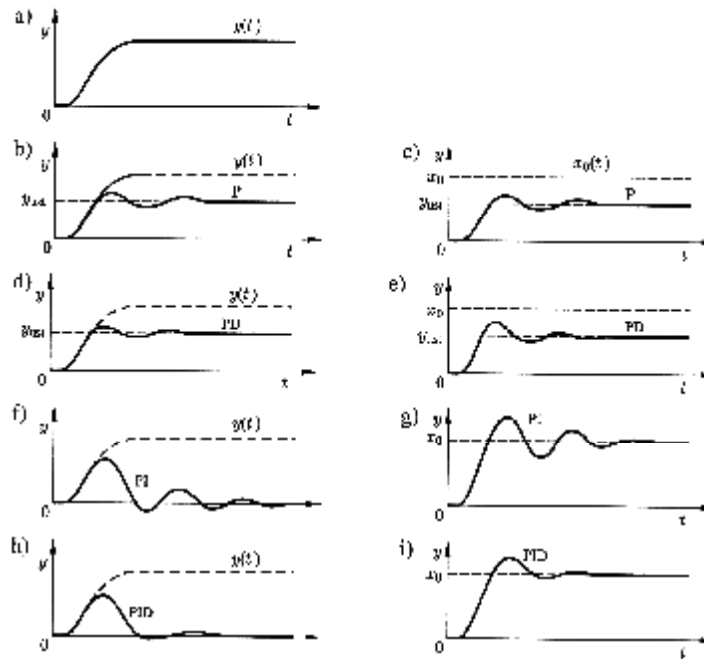
1. Jaka jest różnica między sterowaniem a regulacją?
2. Jaka jest zasadnicza różnica między otwartym a zamkniętym układem sterowania?
3. Z jakich elementów składa się układ sterowania?
4. Jak tworzy się odchyłkę regulacji?
5. Jakie mogą być zadania sterowania?
6. Co to jest transmitancja członu lub układu regulacji?
7. Jaka jest transmitancja zastępcza dwóch elementów o transmitancjach  $G_1(s)$  i  $G_2(s)$ : połączonych szeregowo?
8. Co to jest transmitancja widmowa?
9. Jak wyznaczyć częstotliwościowe charakterystyki amplitudowo-fazowe?
10. Do oceny czego służy kryterium Nyquista?
11. Jakie znasz podstawowe typy regulatorów analogowych?
12. Z jakich elementów składa się regulator?

13. Co to jest zakres proporcjonalności  $x_p$  regulatora?
14. Dlaczego czas  $T_i$  nazywamy czasem zdwojenia?
15. Jaka jest interpretacja graficzna czasu wyprzedzania  $T_d$ ?
16. Jaka jest odpowiedź regulatora P,PI,PD i PID na skokową zmianę sygnału na wejściu?

### 4.1.3. Ćwiczenia

#### Ćwiczenie 1

Na podstawie rysunku zinterpretuj wpływ własności dynamicznych regulatorów na tłumienie zakłóceń i własności dynamiczne układu regulacji. Podaj jaki obiekt podlega procesowi regulacji?



Rysunek do ćwiczenia 1. [9, s. 81]

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

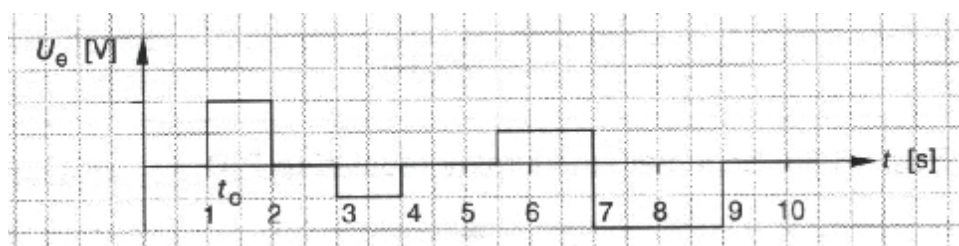
- 1) zapoznać się z materiałem teoretycznym o regulatorach P, PD,PI i PID,
- 2) zorganizować stanowisko pracy do wykonania ćwiczenia,
- 3) rozpoznać na podstawie odpowiedzi skokowej obiekt regulacji (model dynamiczny),
- 4) zinterpretować wpływ poszczególnych regulatorów (ich członów) na tłumienie zakłócenia na wejściu obiektu,
- 5) zinterpretować wpływ poszczególnych regulatorów (ich członów) na właściwości dynamiczne układu regulacji,
- 6) wyciągnąć wnioski z powyższej analizy,
- 7) zaprezentować wykonane ćwiczenie,
- 8) dokonać oceny poprawności wykonania ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- zeszyt,
- przybory,
- literatura z rozdziału 6 wskazana przez nauczyciela.

## Ćwiczenie 2

Na rysunku przedstawiono przebieg uchybu regulacji  $U_e$ . Narysuj przebieg sygnału sterującego  $U_y$  regulatora PI. Wartości nastaw regulatora wynoszą:  $K_p = 2$ ,  $T_i = 1$ s.



Rysunek do ćwiczenia 2. [3, s. 252]

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

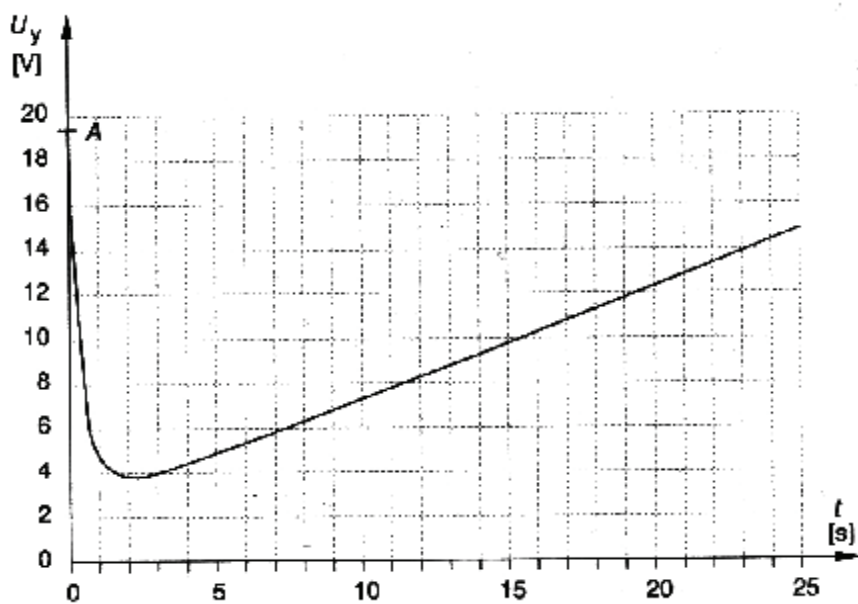
- 1) zapoznać się z materiałem teoretycznym o regulatorze PI i jego nastawach,
- 2) zorganizować stanowisko pracy do wykonania ćwiczenia,
- 3) narysować przebieg sygnału sterującego,
- 4) zaprezentować wykonane ćwiczenie,
- 5) dokonać oceny poprawności wykonania ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- zeszyt,
- przybory do pisania i rysowania,
- literatura z rozdziału 6 wskazana przez nauczyciela.

## Ćwiczenie 3

Wiedząc, że uchyb regulacji zmienił się skokowo o 1 V, na podstawie przedstawionej charakterystyki skokowej regulatora PID określ wartości jego nastaw.



Rysunek do ćwiczenia 3. [3, s. 252]

## Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zapoznać się z materiałem teoretycznym o regulatorze PID i jego nastawach,
- 2) zorganizować stanowisko pracy do wykonania ćwiczenia,
- 3) narysować na kartce papieru milimetrowego formatu A4 daną charakterystykę, przyjmując następującą skalę:  $t = 1 \text{ s} = 1 \text{ cm}$ ,  $U_y = 1 \text{ V} = 0,5 \text{ cm}$ ,
- 4) przedłużyć składową  $y_I$  regulatora, a punkt przecięcia się przedłużenia ze składową
- 5) odczytać wartość punktu przecięcia się przedłużenia ze składową  $y_D$  regulatora ( $\Delta y_P$ ),
- 6) wyznaczyć wartość wzmocnienia  $K_p$ ,
- 7) wyznaczyć punkt, w którym  $y_I = y_P$ ,
- 8) odczytać, w powyższym punkcie, wartość czasu zdwojenia  $T_i$ ,
- 9) odczytać wartość amplitudy impulsu pochodzącego od członu D,
- 10) narysować styczną w punkcie A do składowej  $y_D$  członu D,
- 11) odczytać w punkcie przecięcia wartość stałej czasowej członu D,
- 12) obliczyć  $T_D$ , korzystając ze wzoru:  $T_D = \frac{(A / \Delta e) - K_p}{K_p} T_i$ ,
- 13) podać wartości nastaw regulatora PID,
- 14) zaprezentować wykonane ćwiczenie,
- 15) dokonać oceny poprawności wykonania ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- kartka papieru milimetrowego A4,
- przybory do pisania i rysowania,
- literatura z rozdziału 6 wskazana przez nauczyciela.

### 4.1.4. Sprawdzian postępów

**Czy potrafisz:**

- |                                                                                         | <b>Tak</b>               | <b>Nie</b>               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1) zidentyfikować obiekt regulacji na podstawie odpowiedzi skokowej?                    | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 2) zinterpretować wpływ własności dynamicznych regulatorów na tłumienie zakłóceń?       | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3) zinterpretować wpływ własności regulatorów na własności dynamiczne układu regulacji? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 4) wyjaśnić kryterium Nyquista?                                                         | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 5) wyznaczyć wartości nastaw regulatorów P, PI i PID z ich odpowiedzi na zadany skok?   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

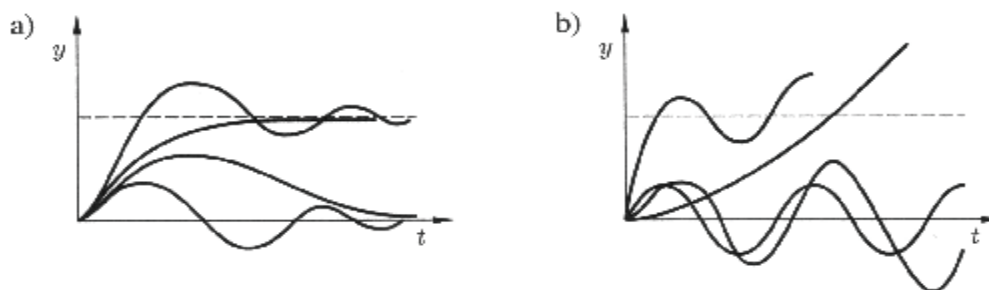
## 4.2. Dobór regulatorów

### 4.2.1. Materiał nauczania

Dobór regulatora do obiektu regulacji musi być poprzedzony sformułowaniem wymagań dotyczących stabilności układu, dokładności statycznej oraz jakości dynamicznej. Typ regulatora wybiera się ze względu na takie właściwości jak:

- wartość odchyłki statycznej w zależności od wartości zadanej oraz w zależności od zakłóceń,
- tłumienia zakłóceń w zależności od szybkości ich zmian,
- szybkość i dokładność nadążania za zmianami wartości zadanej.

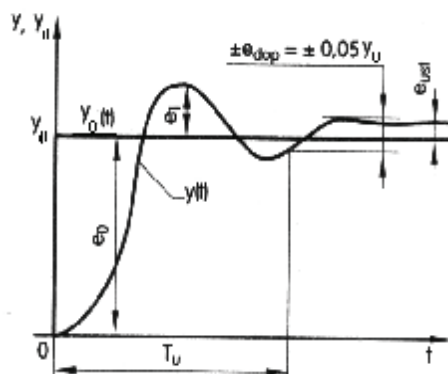
Stabilność układu regulacji polega na tym, że układ wytracony ze stanu równowagi przez sygnał zadany lub zakłócenie wraca do stanu równowagi po zaniknięciu wymuszenia lub zakłócenia (rys. 15). W celu przeprowadzenia analizy układu i odpowiedniego doboru regulatora pod kątem stabilności, jak wcześniej już o tym wspomniano, potrzebna jest znajomość charakterystyk częstotliwościowych i kryteriów stabilności, np. kryterium Nyquista.



Rys. 15. Przebiegi przejściowe: a) w układach stabilnych, b) w układach niestabilnych [6, s. 55]

Dokładność statyczną określa się na podstawie uchybu statycznego. Uchyb statyczny  $e_{ust}$  jest to maksymalna różnica między wartością sygnału wyjściowego  $y$  z obiektu regulacji, a wartością zadaną  $y_0$  w stanie ustalonym (rys. 16.):

$$e_{ust} = y_0 - y.$$



Rys. 16. Przebieg przejściowy wielkości regulowanej w odpowiedzi na wymuszenie skokowe  $y_0(t) = y_{0ust}$  [11, s. 48]

Jakość dynamiczną określa się na podstawie: czasu regulacji, odchylenia maksymalnego oraz przeregulowania (rys. 16.).



Czas regulacji  $T_u$  jest to czas od chwili podania wymuszenia skokowego na wejściu układu aż do chwili po której różnica między wartością odpowiedzi skokowej, a jej wartością w stanie ustalonym nie przekracza 5% wartości ustalonej. Odchylenie maksymalne  $e_1$  jest to maksymalna wartość uchybu przejściowego.

Przeregulowanie  $\kappa = \frac{e_1}{e_0} \cdot 100\%$  jest to stosunek maksymalnego uchybu przejściowego  $e_1$  do maksymalnego uchybu początkowego  $e_0$  wyrażony w procentach.

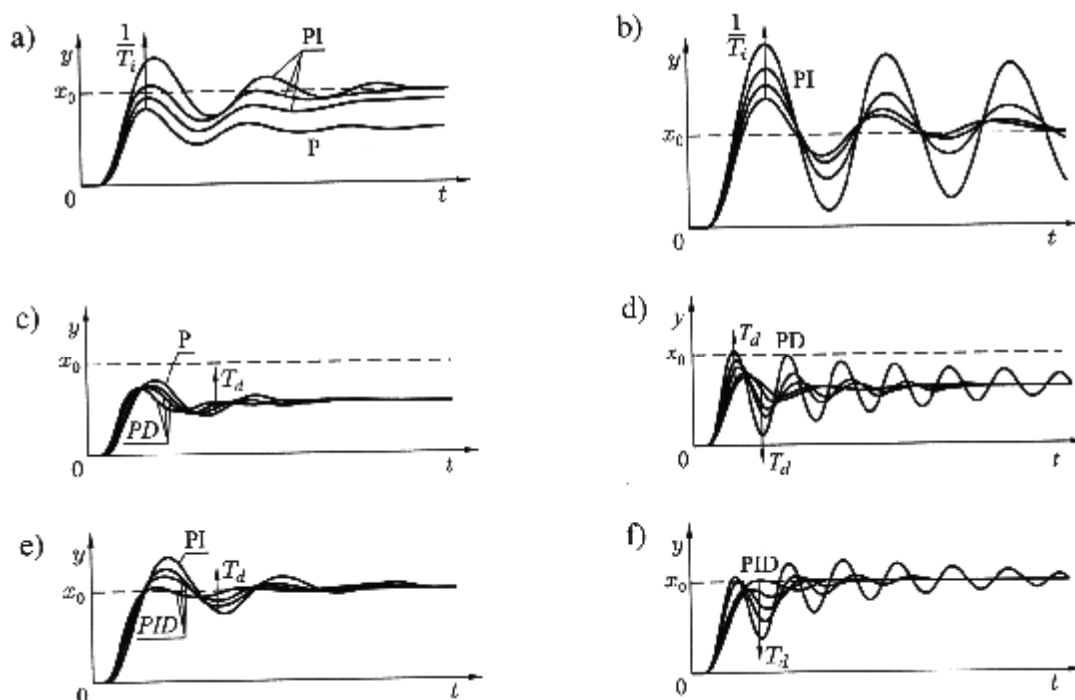
**Tabela 2.** Odpowiedzi układu regulacji na wymuszenie skokowe na wejściu obiektu oraz na wejściu regulatora [11, s. 49]

Rodzaj przebiegu	aperiodyczny	oscylacyjny
Wymuszenie na wejściu obiektu	Regulator astatyczny 	Regulator astatyczny 
	Regulator statyczny 	Regulator statyczny 
Wymuszenie na wejściu regulatora	Regulator astatyczny 	Regulator astatyczny 
	Regulator statyczny 	Regulator statyczny 

W tabeli 2 przedstawiono odpowiedzi skokowe układów regulacji w zależności od miejsca wprowadzenia wymuszenia skokowego (na wejściu do obiektu lub na wejściu do regulatora)

oraz od rodzaju zastosowanych regulatorów - statycznych (P, PD) lub astatycznych (I, PI, PID). Cechą charakterystyczną układów z regulatorami statycznymi jest obecność uchybu statycznego  $\epsilon_{ust}$ . W przypadku stosowania regulatorów zawierających człon całkujący uchyb statyczny nie występuje. Przy stosowaniu regulatorów PI procesy przejściowe zachodzą znacznie wolniej niż przy stosowaniu regulatorów typu P. Stosując regulator PID możemy uzyskać stosunkowo szybki przebieg procesu przejściowego oraz uchyb statyczny równy zero.

Ocena przydatności danego typu regulatora oparta na przebiegach odpowiedzi skokowej układu regulacji, wymaga również porównania odpowiedzi skokowych przy różnych wartościach nastaw regulatorów, ponieważ na charakter przebiegów oprócz typu regulatora mają również wpływ wartości nastaw regulatora (rys.17).



Rys. 17. Właściwości dynamiczne układu regulacji z obiektem statycznym: a), b) - wpływ doboru czasu zdwojenia  $T_i$ , c), d), e), f) - wpływ doboru czasu wyprzedzania  $T_d$  [9, s. 84]

### Częstotliwościowy wskaźnik jakości regulacji

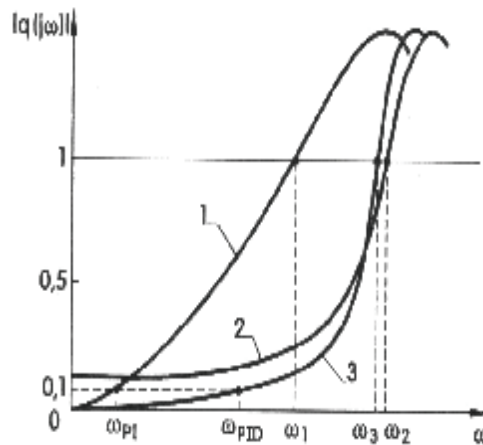
Proces przebiegający w obiekcie regulowanym powinien się zmieniać w określony sposób. Proces sterowania utrudniają czynniki nazywane zakłóceniami. Realizację celu sterowania ocenia się na podstawie wskaźników jakości, np. wartości uchybów w stanie ustalonym czy częstotliwościowego wskaźnika regulacji. Dla układów regulacji istotne jest zapewnienie stabilności układu oraz odpowiedniej jakości tej regulacji i kompensacji zakłóceń. O korzyści wynikającej ze stosowania regulatora w układzie regulacji świadczy wartość tzw. częstotliwościowego wskaźnika jakości regulacji  $q(j\omega)$ . Wskaźnik ten jest równy stosunkowi uchybu regulacji  $\epsilon_r(j\omega)$  w układzie z obiektem o charakterystyce  $G(j\omega)$  i regulatorem o charakterystyce  $R(j\omega)$  do uchybu  $\epsilon_o(j\omega)$  wywołanego przez to samo zakłócenie w obiekcie bez regulatora:

$$q(j\omega) = \frac{\epsilon_r(j\omega)}{\epsilon_o(j\omega)}$$

Dla układu z obiektem o charakterystyce  $G(j\omega)$  i regulatorem o charakterystyce  $R(j\omega)$  obowiązuje zależność:

$$q(j\omega) = \frac{1}{1 + G(j\omega)R(j\omega)}$$

Wynika stąd, że częstotliwościowy wskaźnik jakości regulacji jest identyczny z częstotliwościową charakterystyką uchybową układu regulacji. Na podstawie tej zależności nie występuje sprzeczność między celem poprawy dokładności regulacji i poprawy kompensacji zakłóceń. Problem odnosi się do wymagań dotyczących stabilności układu. Większe wzmocnienie regulatora bowiem pogarsza zapas stabilności układu. Ponieważ charakterystyki  $G(j\omega)$  i  $R(j\omega)$  są zależne od częstotliwości to również stopień poprawy jakości regulacji zależy od częstotliwości. Istotna jest więc relacja  $q(j\omega)$  i widma zakłóceń.



Rys. 18. Moduł częstotliwościowego wskaźnika jakości regulacji obiektu wieloinercyjnego z regulatorami: 1-PI, 2-PD, 3-PID. [4, s. 227]

Na rysunku 18 pokazano przebiegi modułu częstotliwościowego wskaźnika jakości regulacji  $|q(j\omega)|$  dla układu zawierającego obiekt wieloinercyjny i typowy regulator. Kompensacja zakłóceń jest skuteczna w paśmie, w którym  $|q(j\omega)| \leq k$ ,  $k < 1$ . W zakresie, w którym  $|q(j\omega)| > 1$  regulator wzmacnia zakłócenia. Z rysunku wynika, że regulator PI zawęża pasmo skutecznej kompensacji do zakresu  $0 \leq \omega \leq \omega_1$ , ale zapewnia astatyzm, regulator PD ma szersze pasmo lecz nie zapewnia astatyzmu, natomiast regulator PID łączy pozytywne cechy obu regulatorów. Dobór regulatora w zadaniu kompensacji zakłóceń polega więc na ocenie ich pasma, a następnie wyborze regulatora i takim doborze wartości nastaw, aby osiągnąć wymaganą skuteczność kompensacji. W swoich pasmach regulacji, regulatory PI i PID zapewniają dziesięciokrotne tłumienie zakłóceń.

### Metoda Zieglera Nicholasa

Jeżeli charakterystyka dynamiczna obiektu jest nieznaną to nastawy regulatorów dobiera się w sposób doświadczalny metodą opartą na regułach Zieglera i Nicholasa.

Stosując powyższą metodę należy wykonać kolejno następujące czynności:

- regulator włączyć tylko na działanie proporcjonalne (nastawnik zespołu całkującego zamknąć całkowicie -  $T_i \rightarrow \infty$ , a nastawnik zespołu różniczkującego otworzyć całkowicie  $T_d \rightarrow 0$ ),
- zwiększyć wzmocnienie proporcjonalne  $k_p$  tak, aby układ doprowadzić do granicy stabilności (przebieg wielkości regulowanej oscylacyjny o stałej amplitudzie), a nastawioną wartość  $X_p$  oznaczyć jako  $X_{p \text{ kryt}}$ ,
- z wyznaczonego przebiegu wielkości regulowanej określić okres drgań  $T_{\text{kryt}}$ ,
- znając  $X_{p \text{ kryt}}$  i  $T_{\text{kryt}}$  obliczyć nastawy regulatora według następujących wzorów:

- dla regulatora typu P  $k_p = 0,5 K_{kryt}$
- dla regulatora typu PI  $k_p = 0,45 K_{kryt}; T_i = 0,85 T_{kryt}$
- dla regulatora typu PID  $k_p = 0,6 K_{kryt}; T_i = 0,5 T_{kryt}; T_d = 0,12 T_{kryt}.$

W przypadku, gdy jest znana charakterystyka dynamiczna obiektu (dla statycznego- inercja z opóźnieniem – parametry  $k_0, T_0, T_z$  lub dla astatycznego - całkowanie z opóźnieniem – parametry  $T_0, T_c$ ) nastawy regulatorów można obliczyć korzystając ze wzorów zamieszczonych w tabelach 3 i 4.

**Tabela 3.** Dobór nastaw regulatorów w układzie z obiektem statycznym [11, s.51]

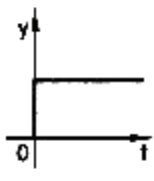
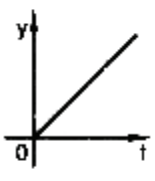
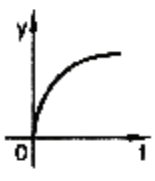
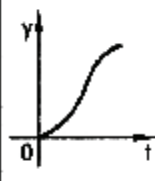
Przebieg wielkości regulowanej	Typ regulatora	Obiekt statyczny o danych: $k_0, T_z, T_0$					
		Wymuszenie wielkością wejściową ( $x$ )			Wymuszenie wielkością zadaną ( $w$ )		
		$k_0 k_p \frac{T_0}{T_z}$	$\frac{T_i}{T_0}$	$\frac{T_d}{T_0}$	$k_0 k_p \frac{T_0}{T_z}$	$\frac{T_i}{T_0}$	$\frac{T_d}{T_0}$
$\kappa = 0$ $\min T_u$	P	0,3	—	—	0,3	—	—
	PI	0,6	$0,8 + \frac{0,5}{T_0/T_z}$	—	0,35	$\frac{1,2}{T_0/T_z}$	—
	PID	0,95	2,4	0,4	0,6	$\frac{1}{T_0/T_z}$	0,5
$\kappa = 20\%$ $\min T_u$	P	0,7	—	—	0,7	—	—
	PI	0,7	$1 + \frac{0,3}{T_0/T_z}$	—	0,6	$\frac{1}{T_0/T_z}$	—
	PID	1,2	2	0,4	0,95	$\frac{1,4}{T_0/T_z}$	0,6

**Tabela 4.** Dobór nastaw regulatorów w układzie z obiektem astatycznym [11, s.52]

Przebieg wielkości regulowanej	Typ regulatora	Obiekt astatyczny o danych: $T_0, T_c$					
		Wymuszenie wielkością wejściową ( $x$ )			Wymuszenie wielkością zadaną ( $w$ )		
		$k_p \frac{T_0}{T_c}$	$\frac{T_i}{T_0}$	$\frac{T_d}{T_0}$	$k_p \frac{T_d}{T_c}$	$\frac{T_i}{T_0}$	$\frac{T_d}{T_0}$
$\kappa = 0$ $\min T_u$	P	0,37	—	—	0,37	—	—
	PI	0,46	5,75	—	0,37	6,0	—
	PID	0,65	5	0,23	0,65	5,0	0,4
$\kappa = 20\%$ $\min T_u$	P	0,7	—	—	0,7	—	—
	PI	0,7	3,0	—	0,7	3,0	—
	PID	1,1	2,0	0,53	1,1	2,0	0,53

Praktycznie, w zależności od wielkości regulowanej oraz właściwości obiektu, dobór regulatorów odbywa się według tabeli 5.

Tabela 5. Dobór regulatora w zależności od wielkości regulowanej i od właściwości obiektu [ 11, s. 48]

Wielkość regulowana	Natężenie przepływu	Pozłom cieczy	Ciśnienie, prędkość kątowna	Temperatura
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe $x(t) = x_{st}$				
Typ regulatora	I, (PI)	PI, (PI)	PI, (PI), (I)	PID, (PI), (PI)

#### 4.2.2. Pytania sprawdzające

Odpowiadając na pytania, sprawdzisz, czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczeń.

1. Jakie są kryteria jakości układów automatycznej regulacji?
2. Jakimi wspólnymi właściwościami charakteryzują się: regulacja typu PI i regulacja typu PID?
3. Co to jest częstotliwościowy wskaźnik jakości regulacji?
4. Dla jakich obiektów stosuje się regulator PI, a dla jakich regulator PID?
5. Jaki regulator najczęściej stosuje się w przypadku obiektów o działaniu całkującym?
6. Co to jest czas regulacji  $T_u$ ?
7. Co to jest przeregulowanie  $\kappa$ ?
8. Kiedy stosujemy dobór nastaw regulatora według zasady Zieglera i Nicholasa?

#### 4.2.3. Ćwiczenia

##### Ćwiczenie 1

Zachowując odpowiednie proporcje narysuj przebieg przejściowy uchybu regulacji w układzie z regulatorem typu PI. Uchyb został spowodowany zakłóceniem skokowym na wejściu obiektu. Przeregulowanie  $\kappa$  ma być równe 40%.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zapoznać się materiałem teoretycznym o regulatorach,
- 2) zorganizować stanowisko pracy do wykonania ćwiczenia,
- 3) skorzystać z tabeli 1 i rozpoznać właściwy przebieg,
- 4) określić wartość maksymalnego uchybu przejściowego i maksymalnego uchybu początkowego, korzystając z tego, że  $\kappa = 40\%$ ,
- 5) narysować przebieg przejściowy uchybu regulacji,
- 6) zaprezentować wykonane ćwiczenie,
- 7) dokonać oceny poprawności wykonania ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- papier milimetrowy,

- przybory do pisania i rysowania,
- literatura z rozdziału 6 wskazana przez nauczyciela.

## Ćwiczenie 2

Dobierz nastawy regulatora PI tak, aby otrzymać przebieg przejściowy z przeregulowaniem  $\kappa \approx 20\%$  i minimum czasu regulacji  $T_u$ . Układem regulacji jest obiekt statyczny o parametrach:  $k_0 = 1,7$ ,  $T_z = 116s$  i  $T_0 = 33s$ .

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

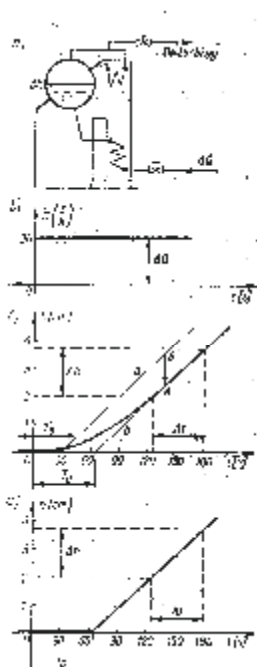
- 1) zapoznać się materiałem teoretycznym dotyczącym doboru nastaw regulatorów,
- 2) zorganizować stanowisko pracy do wykonania ćwiczenia,
- 3) określić wszystkie dane zadania,
- 4) dokonać wyboru odpowiedniej tablicy z wzorami do obliczeń optymalnych nastaw regulatora PI,
- 5) wyznaczyć optymalne nastawy regulatora PI –  $K_p$  i  $T_i$ ,
- 6) sporządzić dokumentację techniczną z przeprowadzonych badań,
- 7) sformułować wnioski z wykonanego ćwiczenia,
- 8) dokonać oceny poprawności przeprowadzonego ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- zeszyt,
- kalkulator,
- przybory do pisania.

## Ćwiczenie 3

Oblicz wartości optymalnych nastaw regulatora PI dla układu regulacji poziomu cieczy. Charakterystyki dynamiczne obiektu regulacji zostały przedstawione na rysunku. Należy przyjąć przeregulowanie  $\kappa \approx 20\%$  oraz minimalny czas regulacji  $T_u$ . Zakłócenie skokowe oddziałuje na wejście obiektu, którego współczynnik wzmocnienia  $K_{OB} = 1$ .



**Rysunek do ćwiczenia 3.** Kocioł walczkowy jako obiekt regulacji poziomu cieczy: a) schemat kotła, b) przyrost dopływu wody, c) przyrost poziomu wody w kotle, d) przebieg uproszczony (po aproksymacji) [10, 321]



## Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

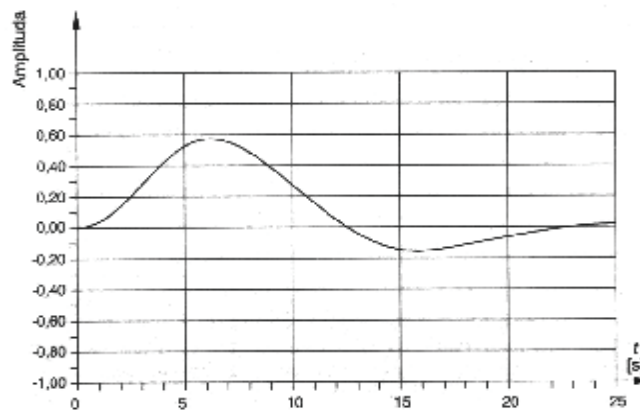
- 1) zapoznać się materiałem teoretycznym dotyczącym doboru nastaw regulatorów,
- 2) zorganizować stanowisko pracy do wykonania ćwiczenia,
- 3) określić wszystkie dane zadania,
- 4) rozpoznać model obiektu regulacji,
- 5) dokonać wyboru odpowiedniej tablicy ze wzorami do obliczeń optymalnych nastaw regulatora PI,
- 6) odczytać z wykresu wartość  $T_0$ ,
- 7) wyznaczyć wartość stałej całkowania  $T_c$  obiektu,
- 8) wyznaczyć optymalne nastawy regulatora PI –  $K_p$  i  $T_i$ ,
- 9) sporządzić wnioski z przeprowadzonych obliczeń,
- 10) dokonać oceny poprawności wykonanego ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- zeszyt,
- kalkulator,
- przybory do pisania.

## Ćwiczenie 4

Odczytaj z rysunku, przedstawiającego wyniki symulacji komputerowej stanu nieustalonego układu regulacji ciśnienia spowodowanego sygnałem zakłócającym, maksymalny uchyb początkowy  $e_{p0}$ , przeregulowanie  $\kappa$  wielkości regulowanej oraz czas regulacji  $T_u$ . Przedział tolerancji jest równy  $\pm 0,1$  wartości zadanej.



Rysunek do ćwiczenia 4. [3, s. 256]

## Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zapoznać się materiałem teoretycznym dotyczącym wskaźnikom jakości dynamicznej doboru regulatorów do układu regulacji,
- 2) zorganizować stanowisko pracy do wykonania ćwiczenia,
- 3) określić wszystkie dane zadania,
- 4) narysować na rysunku przedział tolerancji,
- 5) odczytać z wykresu wartość  $T_u$ ,

- 6) odczytać z wykresu maksymalny uchyb początkowy  $e_{p0}$  i maksymalny uchyb przejściowy  $e_1$ ,
- 7) wyznaczyć wartość przeregulowania  $\kappa$ ,
- 8) sporządzić wnioski z przeprowadzonych obliczeń,
- 9) dokonać oceny poprawności wykonanego ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- zeszyt,
- kalkulator,
- przybory do pisania i rysowania,
- literatura z rozdziału 6 wskazana przez nauczyciela.

### Ćwiczenie 5

Kompensacja zakłóceń z użyciem regulatorów ciągłych P, PI, PID – dobór nastaw regulatorów [4, s.230].

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zorganizować stanowisko pracy do wykonania ćwiczenia,
- 2) zapoznać się z danymi technicznymi, schematami i instrukcją obsługi regulatora PID,
- 3) zapoznać się z aparaturą stosowaną w ćwiczeniu oraz badanym obiektem regulacji,
- 4) zapoznać się z procedurą zmian trybu pracy regulatora,
- 5) zapoznać się ze sposobem zmian wartości nastaw regulatora,
- 6) zmontować układ, sprawdzić poprawność połączeń,
- 7) zidentyfikować obiekt regulacji przez wyznaczenie odpowiedzi skokowej (przełączyć układ na sterowanie ręczne),
- 8) wyznaczyć parametry obiektu (dla statycznego:  $K_o$ ,  $T_0$ ,  $T$ ; dla astatycznego:  $T_0$ ,  $T$ ),
- 9) obliczyć wartości nastaw regulatora (Tabela 3 lub Tabela 4) dla zakłócenia występującego na wejściu obiektu regulacji dla określonej wartości przeregulowania i czasu regulacji,
- 10) sprawdzić doświadczalnie poprawność doboru nastaw,
- 11) przeprowadzić dobór nastaw regulatora metodą Zieglera - Nicholasa,
- 12) sprawdzić działanie regulatora z tak dobranymi nastawami,
- 13) porównać wyniki otrzymane gdy nastawy regulatora dobrano do znanego obiektu, z dobranymi metodą Zieglera – Nicholasa,
- 14) wyznaczyć rachunkowo częstotliwościowy wskaźnik regulacji dla jednego z badanych regulatorów,
- 15) zarejestrować wpływ zakłócenia okresowego o znanej częstotliwości na sam obiekt i obiekt w układzie regulacji,
- 16) porównać wyniki doświadczalne z uzyskanymi na charakterystyce  $q(j\omega)$ ,
- 17) opracować wnioski z ćwiczenia,
- 18) dokonać oceny ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- regulator uniwersalny PID,
- obiekt regulacji o niewielkich stałych czasowych z możliwością wprowadzenia zakłóceń,
- przyrządy pomiarowe (miernik uniwersalny),
- rejestrator z bocznikiem,
- generator bardzo wolnych przebiegów,
- karta katalogowa, instrukcja obsługi regulatora,

- papier, przybory do pisania i rysowania,
- Tabele 3 i 4,
- literatura z rozdziału 6 wskazana przez nauczyciela.

#### 4.2.4. Sprawdzian postępów

**Czy potrafisz:**

	<b>Tak</b>	<b>Nie</b>
1) dobrać regulator ze względu na obiekt regulacji?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2) dobrać regulator ze względu na zadanie sterowania?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3) wyznaczyć z przebiegu sygnału wyjściowego parametry jakościowe regulacji?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4) dobrać nastawy regulatora do znanego obiektu statycznego?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5) dobrać nastawy regulatora do znanego obiektu astatycznego?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6) przeprowadzić dobór nastaw regulatora metodą Zieglera – Nicholasa?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7) zinterpretować częstotliwościowy wskaźnik jakości regulacji?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8) zidentyfikować obiekt regulacji na podstawie odpowiedzi skokowej?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## 4.3. Realizacja programowa regulatora PID w sterowniku PLC

### 4.3.1. Materiał nauczania

#### Regulatory cyfrowe PID

W regulacji cyfrowej są stosowane sterowniki komputerowe oraz sterowniki programowalne PLC. W układach regulacji cyfrowej sygnał odchyłki, zmieniający się w sposób ciągły, jest przetworzony na postać dyskretną, podlegając procesowi kwantowania oraz procesowi próbkowania (informacja o wartości uchybu jest pobierana w określonych, równoodległych chwilach czasu  $T_A$ ). W układach regulacji cyfrowej stosuje się uniwersalny regulator PID, podobnie jak w układach analogowych. Najczęściej stosowany jest regulator PID cyfrowy o algorytmie działania położeniowym oraz różnicowym.

Algorytm regulacji położeniowy o działaniu PID składa się trzech oddzielnych bloków:

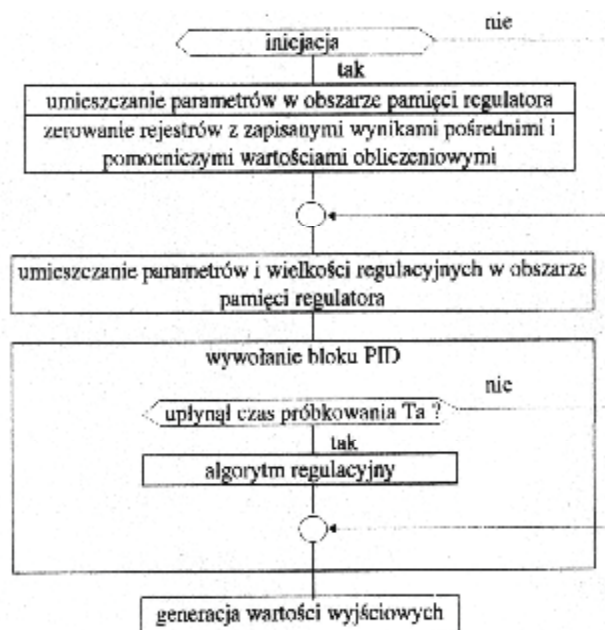
- blok działania proporcjonalnego:  $u_{pn} = K_p e_n$ ,
- blok działania całkującego:  $u_{pn} = K_p \frac{T_A}{T_I} \sum_{i=0}^n e_i$ ,
- blok działania różniczkującego:  $y_{Dn} = K_p \frac{T_D}{T_A} (e_n - e_{n-1})$ , dla dowolnej chwili  $nT_A$ .

W regulacji cyfrowej PID całkowanie zastąpiono sumowaniem a różniczkowanie różnicą wartości. Po zsumowaniu trzech wyżej podanych wartości sygnału sterującego otrzymamy równanie regulatora PID.

W algorytmie różnicowym nie jest obliczana pełna wartość wielkości sterującej  $u_n$ , ale tylko przyrost  $\Delta u_n$ , który jest następnie przesyłany do pamięci i dodawany tam do wartości  $u_{n-1}$ .

#### Sterownik programowalny z blokiem regulacyjnym PID [12]

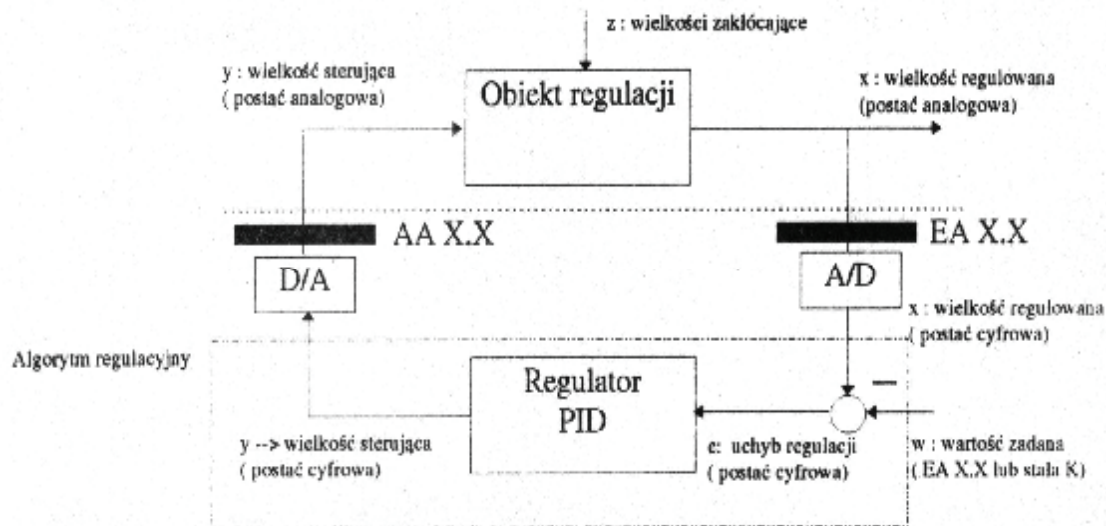
Przykładowo zostanie omówiony regulator PID realizowany w sterowniku z programowalną pamięcią SYSTRON S400 firmy Schiele. W sterowniku tym przy pomocy funkcji PID wywoływany jest blok programowy zawierający dyskretny regulator proporcjonalno-całkująco-różniczkujący (rys.19).



Rys. 19. Ogólna struktura programu SPS z blokiem regulacyjnym. [12, s. 75]

Algorytm PID zaprogramowany jest tylko w systemach operacyjnych sterownika o oznaczeniu MR XXXX. Dla sygnałów wejściowych i wyjściowych oraz parametrów regulatora PID rezerwowany jest każdorazowo obszar pamięci o wielkości 25 słów informacyjnych. Pierwsze słowo tego obszaru określone jest w bloku funkcyjnym PID. Parametry PID odpowiadają w pełni charakterystycznym parametrom regulatorów analogowych PID. Dodatkowo uwzględnia się czas próbkowania  $T_a$  w granicach od 10 ms do 120 s. W rejestrze trybu pracy regulatora można załączyć ograniczenie wielkości wyjściowej sterującej, dokonywany jest wybór algorytmu regulacyjnego (położeniowy lub różnicowy) oraz format wielkości wejściowych i wyjściowych regulatora (8-bitowy lub 12-bitowy),

Wielkość regulowana  $x$  podawana jest na jedno z wejść analogowych sterownika (rys. 20.). Po przetworzeniu na sygnał cyfrowy wielkość  $x$  porównywana jest z zaprogramowaną lub podaną na wejściu analogowym wartością zadaną. W zależności od uchybu regulacji  $e$  i parametrów regulatora obliczana jest wielkość sterująca  $y$ , która po przetworzeniu na sygnał analogowy podawana jest na wyjście analogowe SPS. Sygnał wyjściowy  $y$  może być także podawany w postaci impulsów o zmiennej szerokości na wyjście binarne SPS.



Rys. 20. Sterownik S400 w roli regulatora cyfrowego. [12, s. 75]

### Wartości liczbowe

Regulator PID działa w zakresie zarówno liczb dodatnich jak i liczb ujemnych. Najwyższy bit w słowie informacyjnym (15) określa znak liczby – stan 1 liczba ujemna, stan 0 liczba dodatnia.

Przykład:

Wartość liczbowa	Wzór bitowy	Wartość liczbowa wzoru bitowego
1	00000000 00000001	1
-1	10000000 00000001	32769 (32768 + 1)

W celu przedstawienia liczby ujemnej należy do jej wartości bezwzględnej dodać wartość liczbową 15 bitu słowa informacyjnego, tj. 32768.

Część ułamkowa określana jest przez stałą liczbową  $1/10000$ .

Przykład: 2,58

- część całkowita wynosi 2 --> 2
- część ułamkowa wynosi 0,58 --> 5800

Największa wartość części ułamkowej ograniczona jest do 9999.

### Blok PID

Po wpisaniu funkcji PID w trybie programowym edytora pojawia się blok wywoławczy regulatora PID:

PID

MA:	(MW, K, EA) adres początkowy bloku danych
ST:	(AA, MW) adres dla wielkości sterującej y lub dla informacji o błędach

### Blok informacyjny

W bloku informacyjnym są umieszczone wszystkie dane dotyczące regulatora. Adres początkowy bloku musi odpowiadać adresowi określonymu w bloku wywoławczym PID w polu MA. Szczegółowe informacje o budowie bloku oraz znaczeniu poszczególnych słów znajdziesz w pozycji 15 wykazu literatury z działu 6.

### 4.3.2. Pytania sprawdzające

Odpowiadając na pytania, sprawdzisz, czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczeń.

1. W jakich systemach operacyjnych sterownika S400 zaprogramowany jest algorytm PID?
2. Jaki obszar pamięci zarezerwowany jest dla sygnałów wejściowych i wyjściowych oraz parametrów regulatora PID?
3. Jaki parametr charakterystyczny mają wszystkie regulatory programowe?
4. W jakim formacie zapisuje się wielkość zadaną w i regulowaną x?
5. Jakie algorytmy regulacyjne może realizować regulator PID?
6. Jak konwencję przyjęto dla przedstawienia liczb ujemnych w sterowniku SPS?
7. Co podawane jest w polu ST bloku wywoławczego regulatora PID?
8. Jak zbudowany jest blok informacyjny i co zawiera?

### 4.3.3. Ćwiczenia

#### Ćwiczenie 1

Badanie regulatora P [12, s. 82] – odpowiedź regulatora na wymuszenie skokowe. Zaprogramuj regulator P o parametrach:

- wzmacnienie  $K_p = 1$ ,
- czas próbkowania  $T_a = 20$  s,
- zakres wielkości sterującej od 0 ... 255,
- algorytm położeniowy,
- wartość oczekiwana  $w = 100$ ,
- wartość regulowana przez pierwsze 4 okresy próbkowania – brak reakcji obiektu regulacji  $k$  (0 ... 3)  $\rightarrow x = 0$ , dla  $k$  (4 ... 8) nastawić  $x = 50$ .

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zorganizować stanowisko pracy do wykonania ćwiczenia,



- 2) zapoznać się z dokumentacją sterownika PLC z wbudowanym blokiem regulacyjnym PID,
- 3) zapoznać się z budową sterownika,
- 4) poznać sposób programowania bloku regulacyjnego PID,
- 5) określić dane regulatora P,
- 6) dokonać przeliczenia parametrów,
- 7) napisać program regulatora P,
- 8) zaprogramować regulator P w sterowniku,
- 9) przygotować tabelę do zapisywania: wartości oczekiwanej w, sterującej y, odchyłki błędu e, regulowanej x, czasu próbkowania, czasu t dla 8 kolejnych okresów próbkowania,
- 10) zanotować w tabeli wyż. wym. wartości,
- 11) narysować charakterystykę  $y_k = f(t_k)$  dla k (0 ... 8),
- 12) zaprezentować wykonane ćwiczenie,
- 13) dokonać oceny ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- sterownik PLC (np. SYSTRON S400 z oprogramowaniem SPS 400PO),
- dokumentacja sterownika (opis techniczny sterownika),
- komputer osobisty kompatybilny z IBM – AT,
- oprogramowanie,
- papier, przybory do pisania i rysowania,
- literatura z rozdziału 6 wskazana przez nauczyciela.

## Ćwiczenie 2

Badanie regulatora dyskretnego PI [12, s. 84] – odpowiedź regulatora na wymuszenie skokowe. Zaprogramuj regulator PI o parametrach:

- wzmocnienie  $K_p = 1$ ,
- czas całkowania  $T_n = 200$  s,
- czas próbkowania  $T_a = 20$  s,
- algorytm położeniowy,
- zakres wielkości sterującej od 0 ... 255,
- wartość oczekiwana  $w = 100$ ,
- wartość regulowana przez pierwsze 4 okresy próbkowania – brak reakcji obiektu regulacji k (0 ... 3)  $\rightarrow x = 0$ , dla k (4 ... 8) nastawić  $x = 50$ .

W celu symulacji obiektu regulacji wykorzystaj dla sygnału x wejście analogowe EA 0.0 i dla wartości oczekiwanej w wejście analogowe EA 0.1.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zorganizować stanowisko pracy do wykonania ćwiczenia,
- 2) zapoznać się z dokumentacją sterownika z wbudowanym blokiem regulacyjnym PID,
- 3) zapoznać się z budową sterownika,
- 4) poznać sposób programowania bloku regulacyjnego PID,
- 5) określić dane regulatora PI,
- 6) dokonać przeliczenia parametrów,
- 7) napisać program regulatora PI,
- 8) zaprogramować regulator PI w sterowniku,
- 9) przygotować tabelę do zapisywania: wartości oczekiwanej w, regulowanej x, odchyłki błędu

- e, sterującej członu P, członu I oraz regulatora PI, czasu próbkowania i czasu  $t$  dla 8 kolejnych okresów próbkowania,
- 10) odnotować wielkości w tabeli,
  - 11) narysować charakterystykę  $y_k = f(t_k)$  dla  $k (0 \dots 8)$ ,
  - 12) zaprezentować wykonane ćwiczenie,
  - 13) dokonać oceny ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- sterownik PLC (np. SYSTRON S400 z oprogramowaniem SPS 400PO),
- dokumentacja sterownika (opis techniczny sterownika),
- komputer osobisty kompatybilny z IBM – AT,
- oprogramowanie,
- papier, przybory do pisania i rysowania,
- literatura z rozdziału 6 wskazana przez nauczyciela.

#### 4.3.4. Sprawdzian postępów

	Tak	Nie
<b>Czy potrafisz:</b>		
1) podać wartość liczbową wzoru bitowego liczby ujemnej?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2) zapisać część ułamkową liczby w konwencji przyjętej w sterowniku SPS?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3) omówić ogólną strukturę programu SPS z blokiem regulacyjnym?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4) przeliczać współczynniki regulatorów?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5) zaprogramować regulator P, PI i PID?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6) zmierzyć odpowiedzi skokowe regulatorów?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## 6. LITERATURA

1. Barlik R., Nowak M.: Układy sterowania i regulacji urządzeń energoelektronicznych. WSiP, Warszawa 1998
2. Findeisen Wł. (red): Poradnik inżyniera automatyka. WNT, Warszawa 1973
3. Hörnemann E., Hübscher H., Klaue J., Schierack K., Stolzenburg R.: Elektrotechnika. Instalacje elektryczne i elektronika przemysłowa. WSiP, Warszawa 1998
4. Komor Z.: Pracownia automatyki. WSiP, Warszawa 1996
5. Kordowicz-Sot A.: Automatyka. WSiP, Warszawa 1998
6. Kordowicz-Sot A.: Automatyka i robotyka. Układy regulacji automatycznej. WSiP, Warszawa 1999
7. Kostro J.: Elementy, urządzenia i układy automatyki. WSiP, Warszawa 1997
8. Markowski A., Kostro J., Lewandowski A.: Automatyka w pytaniach i odpowiedziach. WNT, Warszawa 1979
9. Płoszajski G.: Automatyka. WSiP, Warszawa 1995
10. Pułaczewski J.: Automatyka. PWSZ, Warszawa 1969
11. Siemianko Fr., Gawrysiak M.: Automatyka i robotyka. WSiP, Warszawa 1996
12. Skrypt kursu dla początkujących SPS 1/1 - Wprowadzenie techniki sterowników z programowalną pamięcią do polskich szkół kształcenia zawodowego: Opis techniczny sterownika z programowalną pamięcią SYSTRON S400. Oprogramowanie w języku polskim. Projekt-Management GmbH
13. Technika sterowników z programowalną pamięcią. WSiP, Warszawa 1998