

## 4. MATERIAŁ NAUCZANIA

### 4.1. Klasyfikacja układów sterowania

#### 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. Obiektem 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 zadaniem 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.

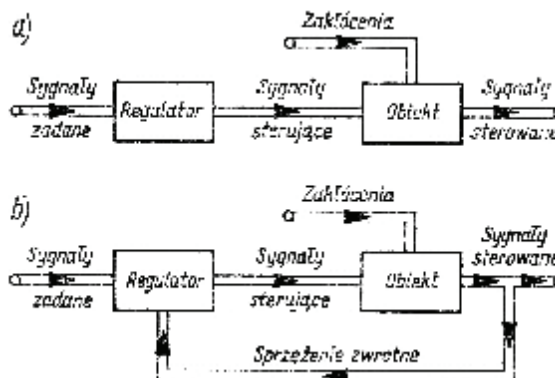
Sygnaly wyjściowe obiektu sterowania są zwane sygnałami sterowanymi, a sygnaly wejściowe to sygnaly sterujące – realizujące sterowanie obiektu oraz zakłócenia – wszelkie inne oddziaływania, utrudniające realizację zadania sterowania. Ze względu na ilość wejść i wyjść obiekty możemy podzielić na: jednowejsciowe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



Rys. 1. Obiekt sterowania: a) o jednym sygnale wejściowym i wyjściowym, b) o wielu sygnał wejściowych i wyjściowych [8, s. 6]

Zadanie sterowania ma zazwyczaj postaćżądanego przebiegu sygnałów sterowanych i jest wówczas zwane sygnałem zadanym.

Układ dokonujący sterowania – wytwarzający sygnaly sterujące – jest zwany urządzeniem sterującym. Sygnałem 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.

Układy sterowania otwartego występują we wszelkich rodzajach automatów o działaniu cyklicznym. Do tych urządzeń należą automaty handlowe (np. sprzedaż biletów, napojów), automaty oświetleniowe, itp. W każdym z nich sygnał wejściowy inicjujący cykl powoduje pojawienie się określonej wielkości wyjściowej z obiektu, np. po wrzuceniu monety, żetonu (sygnał wejściowy) uzyskuje się puszkę napoju (sygnał wyjściowy).

W układzie otwartym, obieg sygnału nie tworzy obwodu zamkniętego.

Układy sterowania otwartego są nieprzydatne do stabilizacji wielkości wyjściowej. Konieczny jest inny sposób 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.

Istotą tej struktury jest występowanie toru, po którym wielkość wyjściowa  $y$  z wyjścia obiektu jest przesyłana na jego wejście. W układzie tworzy się zamknięty obwód przekazywania sygnałów. Układ o tej strukturze sterowania jest układem sterowania ze sprzężeniem zwrotnym.

W układach sterowania ze sprzężeniem zwrotnym do elementarnych zadań sterowania należy realizacja warunku

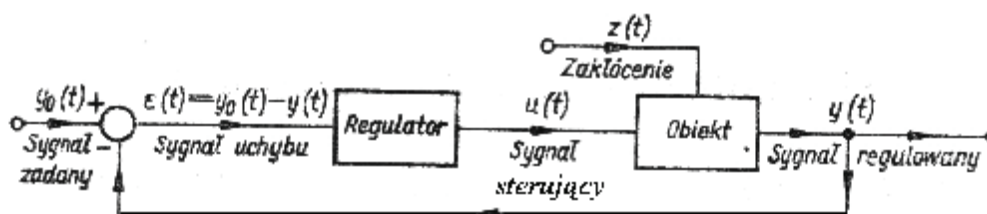
$$y_0 - y = \varepsilon \rightarrow 0$$

tzn. utrzymanie uchybu  $\varepsilon$  na poziomie bliskim zeru, co jest równoznaczne ze stabilizacją sygnału  $y$  na poziomie  $y_0$ .

Układy sterowania, których celem jest spełnienie tego elementarnego warunku, należą do układów regulacji.

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]

Mechanizacja to zastępowanie wysiłku fizycznego człowieka lub zwierzęcia pracą mechaniczną różnego rodzaju silników. Bezpośrednie sterowanie przez człowieka procesami zmechanizowanymi nazywamy sterowaniem ręcznym, mimo że w trakcie sterowania zaangażowane są zdolności intelektualne człowieka. W sterowaniu automatycznym czynności

sterownicze wykonuje za człowieka specjalne urządzenie sterujące. Bezpośredni udział człowieka w tym sterowaniu jest zbędny. Człowiek przyjmuje funkcję nadrzędną, formułuje i wprowadza do urządzenia sterującego zadania do wykonania oraz kontroluje i ewentualnie wprowadza korektę nastaw w urządzeniu sterującym. Sterowanie automatyczne jest przedmiotem dyscypliny naukowej zwanej automatyką, obejmującej całokształt zagadnień związanych z automatyzacją sterowania w systemach.

### **Klasyfikacja układów regulacji**

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 pożądane 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 nieprzewidziany, 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.

### **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. Jakie układy regulacji nazywamy adaptacyjnymi?
7. Jakie zadanie sterowania realizuje palnik do cięcia blachy wzdłuż zadanej linii, a jakie pralka automatyczna?

### **4.1.3. Ćwiczenia**

#### **Ćwiczenie 1**

Ze względu na realizowane zadania sklasyfikuj poniższe układy regulacji:

- radarowe układy lotnicze,
- zmywarka do naczyń,
- lodówka,
- obrabiarka dorabiająca klucze.

## Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zapoznać się materiałem teoretycznym o układach regulacji,
- 2) zorganizować stanowisko pracy do wykonania ćwiczenia,
- 3) przeprowadzić analizę działania wymienionych urządzeń,
- 4) określić zadanie sterowania realizowane przez poszczególne urządzenia,
- 5) zaprezentować wykonane ćwiczenie,
- 6) dokonać oceny poprawności wykonania ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- zeszyt,
- przybory do pisania,
- literatura z rozdziału 6.

## Ćwiczenie 2

Masz do rozpatrzenia dwa przypadki:

- statek po zderzeniu z górą lodową ma uszkodzoną burtę, przez którą wlewa się woda, co powoduje zatopianie statku i jeszcze intensywniejsze wlewanie się wody;
  - kierowca „dodaje gazu”, samochód przyspiesza i po chwili osiąga nową stałą prędkość.
- Czy występuje w obu tych przypadkach zjawisko sprzężenia zwrotnego? Jeśli tak, to jaki znak mają te sprzężenia?

## Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zapoznać się z materiałem teoretycznym o układach regulacji,
- 2) zorganizować stanowisko pracy do wykonania ćwiczenia,
- 3) przeanalizować zachowanie się statku w chwili katastrofy,
- 4) określić czy występuje zależność pomiędzy ilością wlewającej się wody a szybkością zatopiania statku, jeżeli tak to jaka to jest zależność,
- 5) przeanalizować zachowanie się samochodu po „dodaniu gazu”,
- 6) określić czy występuje zależność pomiędzy „dodaniem gazu” a nową prędkością samochodu,
- 7) określić jaka różnica występuje pomiędzy tymi przypadkami,
- 8) określić rodzaj sprzężenia zwrotnego,
- 9) zaprezentować wykonane ćwiczenie,
- 10) dokonać oceny poprawności wykonania ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- zeszyt,
- przybory do pisania,
- literatura z rozdziału 6.

## Ćwiczenie 3

Dla żelazka z termoregulatorem określ:

- wielkość regulowaną wartość zadaną, sygnał sterujący i sygnał zakłócający,
- obiekt regulacji, urządzenie pomiarowe i urządzenie regulujące.

Określ zadanie sterowania realizowane przez żelazko. Jakie skutki pociągnie za sobą zaspawanie styków wyłącznika bimetalowego?

## Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zapoznać się materiałem teoretycznym dotyczącym układów regulacji,
- 2) zorganizować stanowisko pracy do wykonania ćwiczenia,
- 3) zaobserwować sposób działania żelazka z termoregulatorem,
- 4) określić zadanie sterowania realizowane przez żelazko z termoregulatorem podczas prasowania,
- 5) określić sygnały zadany, sterujący, zakłócający i regulowany,
- 6) podać, które elementy żelazka pełnią rolę obiektu regulacji, urządzenia pomiarowego i urządzenia wykonawczego,
- 7) przeanalizuj skutki zaspawania styków wyłącznika bimetalowego,
- 8) zaprezentować wykonane ćwiczenie,
- 9) dokonać oceny poprawności wykonanego ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- żelazko z termoregulatorem,
- deska do prasowania (ew. kocyk),
- szmatka do prasowania,
- zeszyt,
- przybory do pisania,
- literatura z rozdziału 6.

### 4.1.4. Sprawdzian postępów

**Czy potrafisz:**

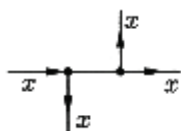
- |                                                                                   | <b>Tak</b>               | <b>Nie</b>               |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1) rozpoznać i sklasyfikować układy regulacji występujące np. w Twoim mieszkaniu? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 2) określić zadanie sterowania realizowane przez artylerię przeciwlotniczą?       | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3) narysować schemat blokowy układy regulacji?                                    | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 4) wyjaśnić dlaczego w układach regulacji występuje ujemne sprzężenie zwrotne?    | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 5) określić podstawowy cel układów regulacji?                                     | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

## 4.2. Podstawowe człony dynamiczne

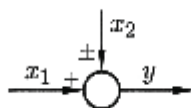
### 4.2.1. Materiał nauczania

#### Schematy blokowe

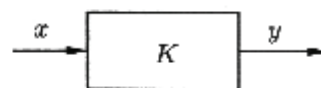
Urządzenia i układy automatyki są często przedstawiane graficznie w postaci schematów blokowych. Na schematach tych wszystkie człony przedstawiane są w formie prostokątów, zwanych blokami (rys. 6). Kierunki przepływu sygnałów zaznaczone są na schematach strzałkami, a zależność pomiędzy sygnałami wejściowym i wyjściowym jest podawana wewnątrz bloku. Przy sporządzaniu tych schematów dopuszczalna jest dość duża dowolność, np. opis właściwości statycznych może być przedstawiony w postaci charakterystyki statycznej wyrażonej graficznie lub analitycznie, właściwości dynamiczne – wyrażone w postaci równania różniczkowego, w postaci operatorowej (transmitancji) lub odpowiedzi skokowej. Właśnie takie opisy właściwości matematycznych umieszcza się wewnątrz bloków. Wyjątkiem jest element porównujący (sumujący) sygnały, zwany węzłem sumującym (rys. 5). Na schematach blokowych są również węzły informacyjne (rys. 4), które służą do pobierania tej samej informacji przez kilka gałęzi układu.



Rys. 4. Węzeł informacyjny [8, s. 9]



Rys. 5. Węzeł porównujący (sumujący)  $y = x_1 \pm x_2$  [8, s. 9]



Rys. 6. Podstawowy blok [8, s. 9]

Występujące w automatyce układy mają często strukturę wieloobwodową, którą można sprowadzić do postaci układu jednoobwodowego. Korzysta się przy tym z omówionych poprzednio połączeń szeregowych, równoległych i sprzężeń zwrotnych oraz dodatkowych przekształceń (tab. 1), które pomagają w uproszczeniach schematów blokowych.

Tabela 1. Typy przekształceń stosowane do uproszczenia schematów blokowych [8, s. 9-10]

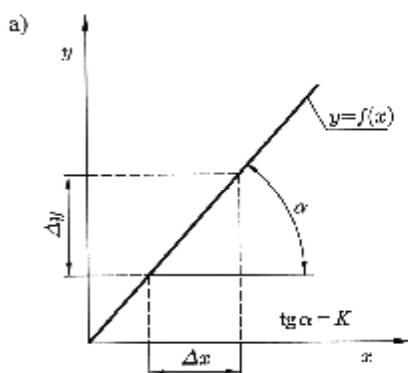
Lp.	Nazwa połączenia	Schemat pierwotny	Schemat zastępczy
1	połączenie szeregowe		
2	połączenie równoległe		
3	sprzężenie zwrotne		
4	zmiana kolejności bloków		

Lp.	Nazwa połączenia	Schemat pierwotny	Schemat zastępczy
5	zmiana kolejności węzłów sumarycznych		
6	zmiana kolejności węzłów informacyjnych		
7	przesunięcie węzła sumacyjnego przed blok		
8	przesunięcie węzła sumacyjnego za blok		
9	przesunięcie węzła informacyjnego przed blok		
10	przesunięcie węzła informacyjnego za blok		

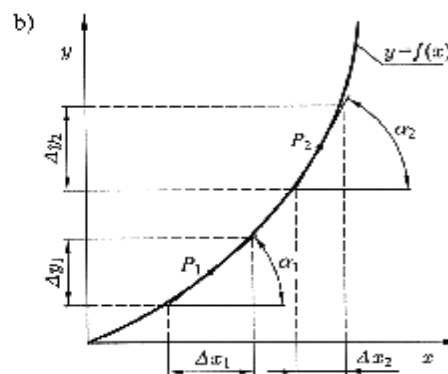
### Własności statyczne i dynamiczne podstawowych elementów automatyki

Jeżeli istnieje prosta proporcjonalność między zmianami sygnału wyjściowego  $y$  i zmianami sygnału wejściowego  $x$  elementu, to charakterystyka statyczna elementu  $y = f(x)$  jest linią prostą (rys.7), a element taki nazywamy liniowym. W charakterystyce liniowej nachylenie wykresu  $K$ , nazywane współczynnikiem wzmocnienia, ma wartość stałą, niezależną od wartości sygnału wejściowego, która jest równa tangensowi kąta nachylenia charakterystyki statycznej.

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{const}$$



Rys. 7. Charakterystyka statyczna elementu liniowego [8, s.14]



Rys. 8. Charakterystyka statyczna elementu nieliniowego [8, s. 14]

W układach regulacji automatycznej rzeczywiste elementy mają często charakterystyki statyczne nieliniowe, w których współczynnik wzmocnienia zależy od wartości sygnału wejściowego (rys. 8). Człony takie nazywamy nieliniowymi. Przybliżoną wartość współczynnika wzmocnienia elementu nieliniowego, dla określonej wartości sygnału wejściowego, otrzymamy zastępując jego charakterystykę statyczną odcinkiem stycznej w danym punkcie i przyjmując tangens kąta nachylenia stycznej jako wzmocnienie.





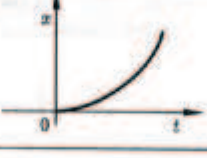
Dla wybranych na wykresie punktów nachylenie wykresu wynosi:

- dla punktu  $P_1$  
$$K_1 = \frac{\Delta y_1}{\Delta x_1} = \operatorname{tg} \alpha_1,$$
- dla punktu  $P_2$  
$$K_2 = \frac{\Delta y_2}{\Delta x_2} = \operatorname{tg} \alpha_2.$$

Zastępowanie charakterystyki nieliniowej odcinkiem linii prostej nazywamy linearyzacją. Linearyzacja pozwala określić wartość współczynnika wzmocnienia jedynie w niewielkim otoczeniu punktu pracy. Im większe jest otoczenie punktu pracy, tym większy jest błąd spowodowany linearyzacją.

Charakterystyki dynamiczne określają zachowanie się bloków w stanach nieustalonych, po zadaniu określonego przebiegu sygnału wejściowego. Do określania charakterystyk dynamicznych układu sterowania lub jego części stosuje się, wytworzone specjalnie w tym celu, standardowe sygnały wejściowe (tab. 2), których przebieg czasowy odwzorowuje z góry określoną funkcję.

**Tabela 2.** Standardowe sygnały wejściowe (wymuszenia) stosowane do badania elementów automatyki [8, s. 15]

Nazwa wymuszenia	Wykres wymuszenia	Równanie
skok jednostkowy (funkcja Heaviside'a)		$x(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases}$
wymuszenie skokowe o dowolnej wartości		$x(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ x_{st}, & t > 0 \end{cases}$
wymuszenie impulsowe (funkcja Diraca)		$x(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \infty, & t = 0 \\ 0, & t > 0 \end{cases}$
wymuszenie liniowo narastające		$x(t) = at$
wymuszenie paraboliczne		$x(t) = at^2$



Najczęściej do określania właściwości dynamicznych członów stosuje się standardowe wymuszenie skokowe jednostkowe przybierające w dowolnej chwili czasu wartość skoku równą jeden a odpowiedź elementu lub układu na to wymuszenie nazywamy odpowiedzią skokową jednostkową. Odpowiedź skokowa członu to odpowiedź na standardowe wymuszenie skokowe przybierające w dowolnej chwili czasu stałą wartość  $x_{st}$ .

### Rodzaje podstawowych członów dynamicznych automatyki. Człon proporcjonalny

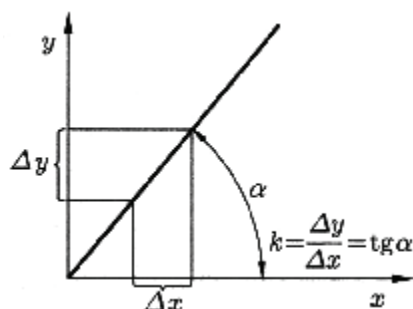
Człon proporcjonalny (bezinercyjny) jest to najprostszy element automatyki, którego właściwości dynamiczne mogą być pominięte i który w związku z tym jest wystarczająco dokładnie opisywany charakterystyką statyczną

$$y = k \cdot x,$$

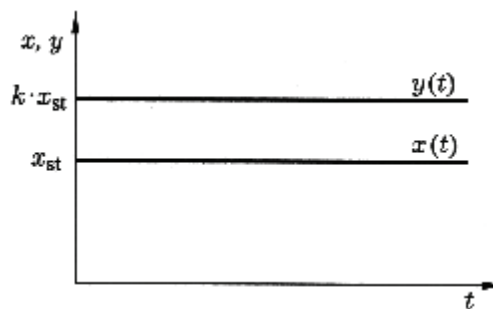
gdzie:

- $y$  – wielkość wyjściowa,
- $x$  – wielkość wejściowa,
- $k$  – współczynnik wzmocnienia (proporcjonalności).

Charakterystykę statyczną elementu proporcjonalnego przedstawia rys. 9, natomiast charakterystykę odpowiedzi skokowej przedstawia rys.10.



Rys. 9. Charakterystyka statyczna elementu proporcjonalnego [8, s. 17]



Rys. 10. Odpowiedź skokowa elementu proporcjonalnego [8, s. 17]

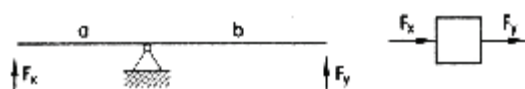
Współczynnik wzmocnienia elementu obliczamy z charakterystyki skokowej:

$$\frac{y(t)}{x(t)} = \frac{k \cdot x_{st}}{x_{st}} = k.$$

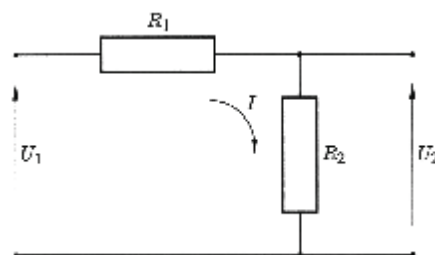
Przykładem elementu proporcjonalnego jest dźwignia dwustronna (rys. 11). Siła  $F_x$  przyłożona do jednego końca dźwigni powoduje, że natychmiast pojawia się na drugim końcu siła  $F_y$ , której wartość zależy od stosunku odległości punktów przyłożenia sił od punktu podparcia dźwigni:

$$F_x \cdot a = F_y \cdot b,$$

$$F_y = \frac{a}{b} \cdot F_x.$$



Rys. 11. Dźwignia dwustronna [12, s. 34]



Rys. 12. Rezystancyjny dzielnik napięcia [8, s. 18]

Przykładem elektrycznego elementu proporcjonalnego jest rezystancyjny dzielnik napięcia (rys. 12). Sygnałem wejściowym  $x$  jest napięcie  $U_1$ , przyłożone w chwili  $t_0$ , które powoduje, że na zaciskach wyjściowych w tej samej chwili pojawi się napięcie  $U_2$  jako sygnał wyjściowy  $y$ , którego wartość wynosi:

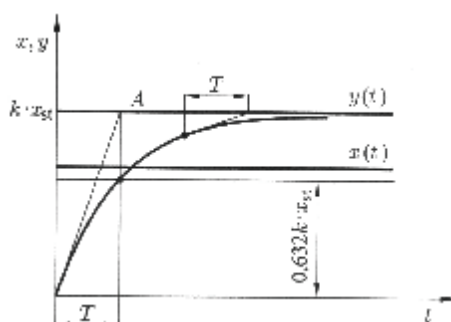
$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_1,$$

gdzie:  $k = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$  - jest wzmocnieniem elementu proporcjonalnego.

Do elementów proporcjonalnych (bezinercyjnych) zaliczamy również wszystkie połączenia sztywne, zawory, przekładnie.

### Człon inercyjny I rzędu

Właściwości dynamiczne członu inercyjnego I rzędu dobrze oddaje jego odpowiedź skokowa (rys. 13). Wielkość wyjściowa tego członu wykazuje, w stosunku do wymuszenia przyłożonego na wejściu, pewną „bezwładność” (inercję). Stąd nazwa tego członu. Człon inercyjny ma także charakterystykę statyczną, która określa zależność między stałą w czasie wartością wielkości wejściowej a wartością ustaloną wielkości wyjściowej.



Rys. 13. Odpowiedź skokowa elementu inercyjnego I rzędu:  $x(t)$  – sygnał wejściowy,  $y(t)$  – sygnał wyjściowy,  $k$ ,  $T$  – parametry członu [8, s. 19]

Odpowiedź na wymuszenie skokowe ma postać:

$$y(t) = k \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right),$$

gdzie:

- $k$  - wzmocnienie członu,
- $e$  – stała (podstawa logarytmów naturalnych),
- $T$  – stała czasowa.

Szybkość zmian wielkości wyjściowej jest charakteryzowana za pomocą parametru  $T$ , zwanego stałą czasową i mającego wymiar czasu. Im większa jest wartość tego parametru, tym wolniej nadąża wielkość wyjściowa za wejściową.

Stają czasową  $T$  członu inercyjnego otrzymujemy jako czas określony rzutem odcinka stycznej  $OA$  na asymptotę wyznaczającą wartość ustaloną wielkości wyjściowej. Możemy wyznaczyć ją również podstawiając do wyżej podanego równania opisującego odpowiedź na wymuszenie skokowe  $t = T$ :

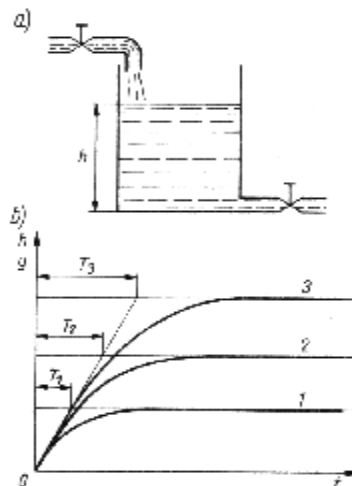
$$y(T) \approx 0,632 \cdot k.$$

W przypadku skokowej zmiany wielkości wejściowej, wielkość wyjściowa członu inercyjnego I rzędu zmienia się w ciągu każdego przedziału czasu o długości  $T$  o ok. 63% różnicy między jej wartością początkową a wartością ustaloną, do której dąży.

Człon inercyjny I rzędu opisany jest równaniem różniczkowym

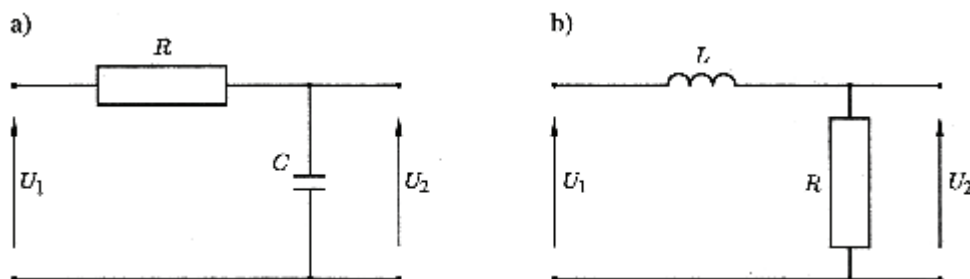
$$T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = k x(t).$$

Charakterystykę członu inercyjnego ma wiele urządzeń (samą lub w połączeniu z innymi członami). Inercję spotykamy przede wszystkim tam, gdzie występuje pokonywanie bezwładności i oporów ruchu. Przykładowo charakterystykę inercyjną będzie miał wykres prędkości wirowania silnika elektrycznego po włączeniu go do sieci, wykres prędkości liniowej samochodu po zmianie położenia dźwigni gazu. Za pomocą inercji możemy przedstawić właściwości dynamiczne np.: żelazka, garnka, w którym podgrzewana jest woda, zbiornika ze swobodnym odpływem (rys.14).



**Rys. 14.** Człon inercyjny: a) model – zbiornik ze swobodnym odpływem, b) odpowiedzi skokowe przy różnych wartościach stosunku średnic otworów: odpływowego i dostarczającego ciecz: 1 – duża średnica otworu odpływowego, 2 – zmniejszona średnica, 3 – mała średnica,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  – stałe czasowe [9, s. 21]

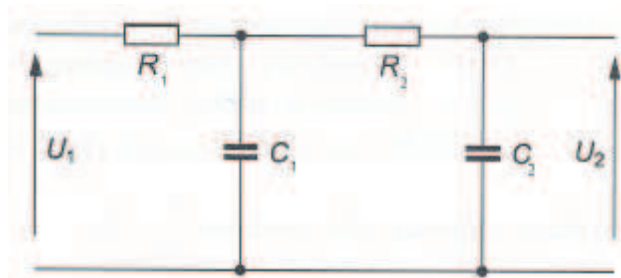
Przykładem w elektronice członu inercyjnego I rzędu jest czwórnik typu RC lub LR (rys.15). W przypadku czwornika RC odpowiedzią na wymuszenie skokowe napięcia  $U_1$ , jest napięcie na ładującym się kondensatorze, a w przypadku czwornika LR – napięcie na odbiorniku, wprost proporcjonalne do narastającego prądu w obwodzie. Stałe czasowe podanych elementów inercyjnych są odpowiednio równe: RC i  $\frac{L}{R}$ .



**Rys. 15.** Realizacja elektryczna elementu inercyjnego I rzędu za pomocą: a) czwornika RC, b) czwornika LR [8, s. 21]

### Człon inercyjny II rzędu

Łańcuchowe połączenie dwóch elementów inercyjnych I rzędu prowadzi do układu zwanego elementem inercyjnym II rzędu. Przykładem w dziedzinie elektroniki takiego elementu może być połączenie dwóch członów inercyjnych typu RC (rys. 16) lub LR.



Rys. 16. Realizacja elektryczna elementu inercyjnego II rzędu [7, s. 20]

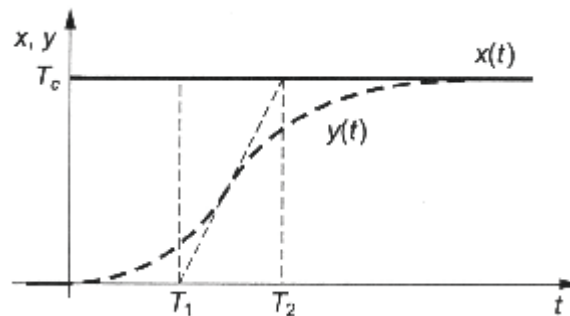
Człon  $R_1C_1$  wprowadza opóźnienie początkowe, ponieważ napięcie na kondensatorze jest traktowane jako sygnał wejściowy dla członu  $R_2C_2$ .

Równanie różniczkowe elementu inercyjnego II rzędu ma postać:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{dy}{dt} + y = kx,$$

gdzie:  $T_1, T_2$  – stałe czasowe,

$k$  – współczynnik proporcjonalności.

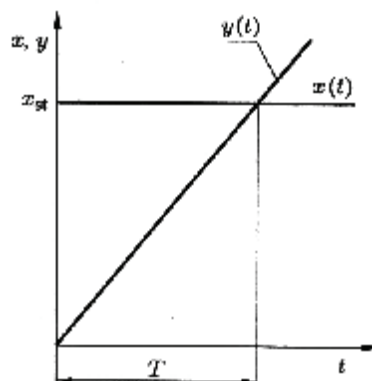


Rys. 17. Odpowiedź skokowa elementu inercyjnego II rzędu:  $x(t)$  – sygnał wejściowy,  $y(t)$  – sygnał wyjściowy [7, s. 19]

Na rys. 17 przedstawiona jest odpowiedź skokowa członu inercyjnego II rzędu oraz sposób wyznaczania stałych czasowych  $T_1, T_2$ . Element inercyjny II rzędu często po uproszczeniu traktowany jest jako element inercyjny I rzędu o stałej czasowej  $T_2$  z początkowym opóźnieniem  $T_1$ . Jest to typowy model dynamiczny wielu procesów przemysłowych.

### Człon całkujący

Charakterystyka odpowiedzi skokowej członu całkującego przedstawiona jest na rys. 18.



Rys. 18. Odpowiedź skokowa członu całkującego:  $x(t)$  – sygnał wejściowy,  $y(t)$  – sygnał wyjściowy [8, s. 21]

Odpowiedź skokowa  $y(t)$  jest określona zależnością:

$$y(t) = \frac{1}{T} x_{st} \cdot t,$$

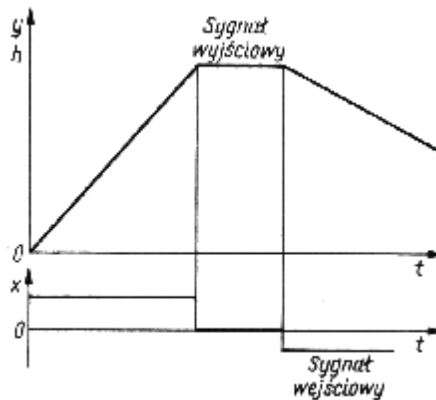
gdzie:

- $T$  – stała czasowa całkowania ( czas, po którym odpowiedź skokowa osiągnie wartość wymuszenia).

Element całkujący opisany jest równaniem różniczkowym:

$$T \frac{dy}{dt} = k \cdot x .$$

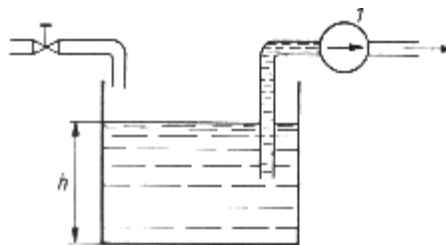
Jak widać z przebiegu odpowiedzi skokowej, która narasta liniowo do nieskończoności, człon całkujący nie osiąga stanu ustalonego. Człon całkujący nazywany jest członem astatycznym, bo nie ma on charakterystyki statycznej. Ponieważ osiąga on stan ustalony tylko przy zerowej wartości sygnału wejściowego (rys. 19).



**Rys. 19.** Zmiana sygnału wyjściowego członu całkującego przy skokowych zmianach sygnału wejściowego [9, s. 22]

Przykładem fizycznym elementu całkującego jest zbiornik, w którym zarówno dopływ, jak i odpływ są wymuszane i niezależne od poziomu cieczy (rys.20).

Jeżeli jako wielkość wyjściową przyjmujemy poziom cieczy w zbiorniku  $H$ , a jako wielkość wejściową otwarcie zaworu doprowadzającego ciec do zbiornika lub załączenie pompy, to wykres zmian sygnału  $y$  z rys. 20 będzie przebiegiem zmian poziomu cieczy w zbiorniku w funkcji czasu.



**Rys. 20.** Model członu całkującego: 1- pompa [9, s.22]

Również silnik elektryczny, idealizując sposób jego rozruchu ( silnik rusza z prędkością znamionową, nie wykazując inercji), jest przykładem modelu członu całkującego. W chwili załączenia napięcia, które dla małych silników ma charakter skokowy, obserwujemy liniowo narastającą liczbę obrotów wału silnika.

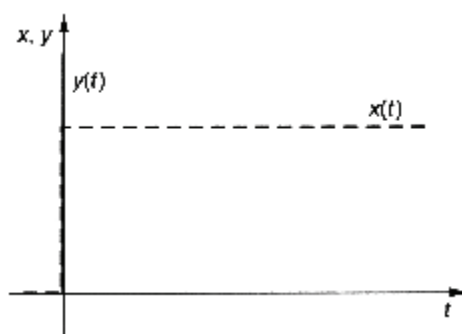
Człon inercyjny I rzędu może, przez pewien czas stanowić dobre przybliżenie członu całkującego. Im większa jest stała czasowa członu inercyjnego, tym dłuższy jest ten czas (rys. 14). W związku z tym, przy bardzo dużych wartościach stałych czasowych członu inercyjnego można go traktować jak człon całkujący.

### Człon różniczkujący

Idealny element różniczkujący opisany jest równaniem różniczkowym:

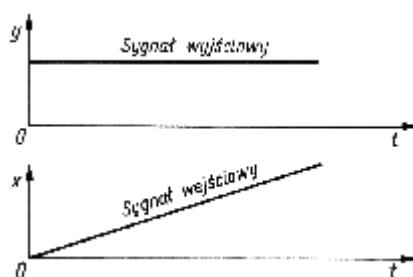
$$y(t) = k \frac{dx}{dt}.$$

Odpowiedzią skokową idealnego członu różniczkującego (rys. 21) jest funkcja Diraca pomnożona przez współczynnik proporcjonalności oraz amplitudę wymuszenia wejściowego. Możemy powiedzieć, że odpowiedzią członu różniczkującego idealnego jest sygnał o znikomym krótkim czasie trwania (o zerowym czasie trwania) i nieskończenie wielkiej amplitudzie.



**Rys. 21.** Odpowiedź skokowa idealnego członu różniczkującego:  $x(t)$  – sygnał wejściowy,  $y(t)$  – sygnał wyjściowy [7, s. 21]

W rzeczywistych układach fizycznych niemożliwe jest uzyskanie impulsu o nieograniczonej amplitudzie, w związku z tym, właściwości członu różniczkującego idealnego bada się wymuszeniem liniowo narastającym (rys. 22).



**Rys. 22.** Odpowiedź idealnego członu różniczkującego przy liniowo narastającym sygnale wejściowym [9, s. 23]

Jak widać na rys. 22, przy liniowo narastającym wymuszeniu na wyjściu idealnego członu różniczkującego otrzymujemy funkcję skokową. Przykładem takiego członu może być prądnicą prądu stałego, której sygnałem wejściowym jest kąt obrotu wału, a sygnałem wyjściowym napięcie o stałej wartości, proporcjonalnej do prędkości wirowania wału.

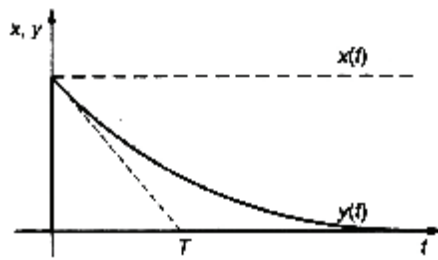
Człon różniczkujący rzeczywisty jest opisany równaniem różniczkowym:

$$T \frac{dy}{dt} + y = k \frac{dx}{dt},$$

gdzie:

- $T$  – stała czasowa członu różniczkującego,
- $k$  – współczynnik wzmocnienia.

Na rys. 23 przedstawiona jest odpowiedź skokowa tego członu.



Rys. 23. Odpowiedź skokowa rzeczywistego członu różniczkującego:  $x(t)$  – sygnał wejściowy,  $y(t)$  – sygnał wyjściowy,  $T$  – stała różniczkowania [7, s. 21]

Przebieg zmian sygnału wyjściowego  $y(t)$  rzeczywistego członu różniczkującego przedstawia zależność:

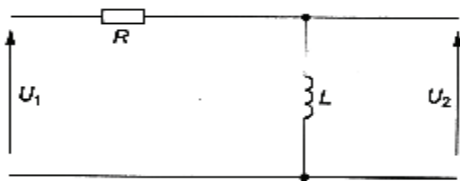
$$y(t) = \frac{k}{T} x_{st} \cdot e^{-\frac{t}{T}},$$

gdzie:  $x_{st}$  – wartość skoku wymuszenia.

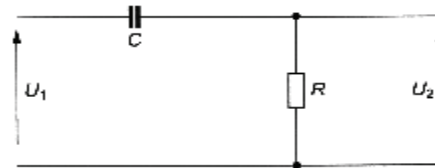
Taką samą odpowiedź skokową jak na rys. 23 otrzymalibyśmy przy szeregowym połączeniu członów: inercyjnego ze stałą czasową  $T$  i różniczkującego idealnego.

Przykładem w elektronice elementu różniczkującego jest dzielnik napięcia RL i czwórnik CR (rys. 24).

a)



b)



Rys. 24. Przykład rzeczywistego członu różniczkującego: a) dzielnik napięcia RL, b) czwórnik CR [7, s. 22, 23]

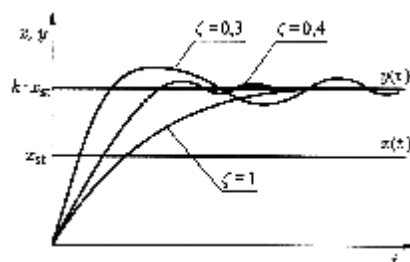
### Człon oscylacyjny

Człon oscylacyjny jest opisany równaniem różniczkowym:

$$T_1^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_2 \frac{dy}{dt} + y = kx(t),$$

gdzie:

- $T_1, T_2$  – stałe czasowe,  $T_2^2 < T_1^2$ ,
- $k$  – współczynnik proporcjonalności.



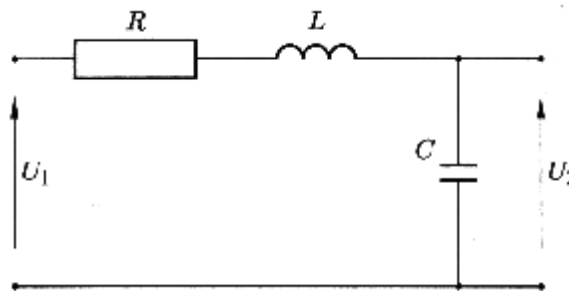
Rys. 25. Odpowiedź skokowa członu oscylacyjnego dla różnych współczynników tłumienia:  $x(t)$  – sygnał wejściowy,  $y(t)$  – sygnał wyjściowy [8, s. 25]

Przebiegi odpowiedzi na wymuszenie skokowe członu oscylacyjnego przedstawia rys. 25. Zależą one od wartości współczynnika tłumienia  $\zeta = \frac{T_2}{T_1}$ . Dla współczynnika  $\zeta \geq 1$

charakterystyka przypomina odpowiedź członu inercyjnego, dla  $\zeta < 1$  występują oscylacje.

Przykładem realizacji elektrycznej elementu oscylacyjnego jest szeregowy obwód rezonansowy złożony z elementów RLC jak na rys. 26. Sygnałem wejściowym układu jest napięcie  $U_1$ , sygnałem wyjściowym – napięcie  $U_2$ . Parametry elementu oscylacyjnego określają następujące zależności:

$$T_1 = \sqrt{L \cdot C}, \quad T_2 = R \cdot C, \quad \zeta = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}.$$



Rys. 26. Realizacja elektryczna elementu oscylacyjnego [8, s. 26]

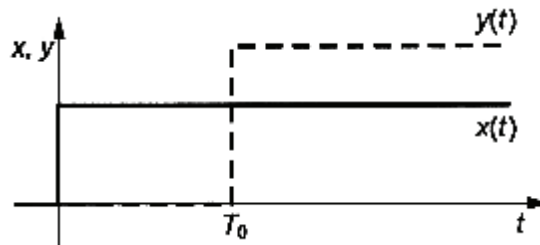
### Człon opóźniający (continuum RL)

Sygnał wyjściowy elementu opóźniającego ma taki sam kształt jak sygnał wejściowy, lecz przesunięty w czasie. Równanie członu opóźniającego ma postać:

$$y(t) = x(t - T_0),$$

gdzie:  $T_0$  – opóźnienie.

Jego odpowiedź skokową przedstawia rys. 27.



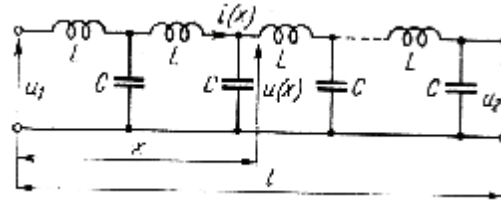
Rys. 27. Odpowiedź skokowa członu opóźniającego:  $x(t)$  – sygnał wejściowy,  $y(t)$  – sygnał wyjściowy [7, s. 25]

Człon opóźniający nie wprowadza zniekształceń sygnału wejściowego, lecz przesuwa go w czasie o pewną stałą wartość  $T_0$ . Człon ten opisuje czas transportu materiału, czas potrzebny do przesłania sygnału. W związku z tym, człon ten często nazywany jest opóźnieniem



transportowym. Przykładami członu opóźniającego są: np. odcinek rurociągu wprowadzający opóźnienie w przesyłaniu jakiegoś medium, taśmociąg. W dziedzinie elektroniki przykładem takiego członu jest linia opóźniająca  $64\mu\text{s}$  (sygnały podawane są w odstępach czasu trwania linii, czyli przez  $64\mu\text{s}$  na matrycę dekodera) stosowana w kolorowych odbiornikach telewizyjnych.

Innym modelem członu opóźniającego jest linia elektryczna, w której uwzględniono tylko indukcyjność  $L$  i pojemność  $C$  na jednostkę długości (rys. 28). Stąd inna nazwa członu opóźniającego – continuum LC.



Rys. 28. continuum LC [15, s. 60]

## 4.2.2. Pytania sprawdzające

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

1. Co umieszcza się wewnątrz bloków na schematach blokowych?
2. Do czego służą węzły informacyjne na schematach blokowych?
3. Jak charakteryzuje się elementy liniowe?
4. Co to jest linearyzacja?
5. Za pomocą czego określa się charakterystyki dynamiczne układu sterowania?
6. Co to jest odpowiedź skokowa jednostkowa?
7. Jaka jest odpowiedź skokowa elementu bezinercyjnego, inercyjnego I rzędu i całkującego?
8. Jakie poznałeś elektryczne modele podstawowych członów automatyki?
9. Jak wyznaczamy stałą czasową elementu inercyjnego I rzędu?
10. Co opisuje człon opóźniający?

## 4.2.3. Ćwiczenia

### Ćwiczenie 1

Udowodnij poprawność schematów zastępczych z tabeli 1 w „Poradniku dla ucznia”:

- przesunięcie węzła sumującego za blok,
- przesunięcie węzła informacyjnego przed blok.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

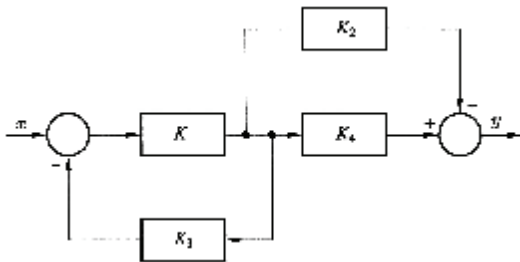
- 1) zapoznać się z tabelą 1,
- 2) zorganizować stanowisko pracy do wykonania ćwiczenia,
- 3) wyznaczyć równania opisujące wartość sygnału  $y$  na schematach pierwotnych i na schematach zastępczych,
- 4) zaprezentować wykonane ćwiczenie,
- 5) dokonać oceny ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

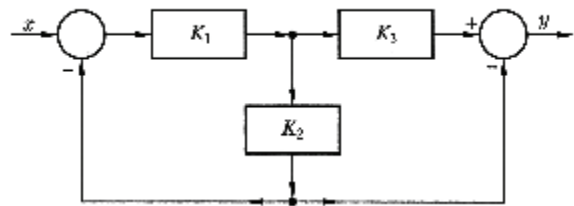
- zeszyt,
- przybory do pisania,
- literatura z rozdziału 6.

### Ćwiczenie 2

Korzystając z tabeli 1 w „Poradniku dla ucznia”, uprość schematy blokowe przedstawione na rysunkach 1 i 2.



Rysunek nr 1 do ćwiczenia 2 [8, s. 12]



Rysunek nr 2 do ćwiczenia 2 [8, s. 12]

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zapoznać się z tabelą 1,
- 2) zorganizować stanowisko pracy do wykonania ćwiczenia,
- 3) dokonać przekształceń podanych schematów blokowych,
- 4) wykonać rysunki kolejnych przekształceń,
- 5) zaprezentować wykonane ćwiczenie,
- 6) dokonać oceny ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

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

### Ćwiczenie 3

Element proporcjonalny zrealizowany za pomocą dwóch rezystorów  $R_1$  i  $R_2$  ma wzmocnienie  $k = 0,25$ . Wartość rezystora  $R_1$  wynosi  $120 \text{ k}\Omega$ . Oblicz wartość rezystora  $R_2$ . Narysuj odpowiedź skokową członu, gdy na wejściu zostało wprowadzone skokowo napięcie  $U_1 = 2\text{V}$ .

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zapoznać się z materiałem teoretycznym o podstawowych członach automatyki,
- 2) zorganizować stanowisko pracy do wykonania ćwiczenia,
- 3) narysować schemat układu,

- 4) obliczyć wartość rezystora  $R_2$ ,
- 5) obliczyć wartość napięcia  $U_2$ ,
- 6) narysować odpowiedź skokową członu,
- 7) zaprezentować wykonane ćwiczenie,
- 8) dokonać oceny ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

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

#### Ćwiczenie 4

Dla elementów: proporcjonalnego, inercyjnego I rzędu, całkującego oraz różniczkującego sprawdź odpowiedź układu na wymuszenie jednostkowe, zmieniając odpowiednio stałe czasowe i wzmocnienie elementów.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zapoznać się z instrukcją wykonania ćwiczenia,
- 2) zorganizować stanowisko pracy do wykonania ćwiczenia,
- 3) zaprojektować układ według wskazań nauczyciela (narysować schematy),
- 4) zgłosić gotowość wykonania ćwiczenia,
- 5) uruchomić program komputerowy,
- 6) napisać program w MATLAB-ie dla danego układu,
- 7) uruchomić program,
- 8) zaprezentować otrzymane charakterystyki odpowiedzi skokowej,
- 9) zmienić nastawy: wzmocnienia i stałej czasowej i obserwować na wykresach zmiany,
- 10) powtórzyć ćwiczenie dla kolejnych elementów,
- 11) sporządzić sprawozdanie z przebiegu ćwiczenia, załączając schematy układów, napisane programy, otrzymane charakterystyki, obliczenia i wnioski z badań,
- 12) zaprezentować otrzymane wyniki,
- 13) dokonać oceny poprawności wykonanego ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- komputer z programem narzędziowym,
- drukarka,
- instrukcja ćwiczenia,
- papier
- przybory do pisania,
- klej, nożyczki,
- literatura z rozdziału 6.

#### 4.2.4. Sprawdzian postępów

<b>Czy potrafisz:</b>	<b>Tak</b>	<b>Nie</b>
1) udowodnić poprawność schematów zastępczych z tabeli 1?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2) uprościć schemat blokowy do jednego bloku?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3) narysować odpowiedzi skokowe podstawowych członów automatyki?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4) podać realizację elektryczną członu inercyjnego II rzędu i obliczyć stałe czasowe oraz odczytać je z przebiegu odpowiedzi skokowej?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5) odczytać z przebiegu odpowiedzi skokowej wartości wzmocnienia, stałej czasowej dla elementu inercyjnego I rzędu i elementu różniczkującego rzeczywistego?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## 4.3. Obiekty regulacji

### 4.3.1. Materiał nauczania

#### Rodzaje obiektów regulacji

Obiektem regulacji nazywamy urządzenie lub zespół urządzeń, w których przebiega proces technologiczny lub jest realizowany, poprzez zewnętrzne oddziaływanie sterujące, pożądany algorytm działania. Może to być: obrabiarka sterowana numerycznie, zbiornik ciśnienia, autoklaw, piec hartowniczy, itp.

Przedmiotem sterowania (regulacji) jest wielkość fizyczna związana z zachodzącym w obiekcie procesem. Jest to wielkość wyjściowa obiektu, którą nazywamy wielkością regulowaną (sterowaną). Przebieg wielkości regulowanej zależy od wielkości sterujących oraz od zakłóceń oddziałujących na obiekt. Przykładem wielkości regulowanej może być np. temperatura w piecu w procesie hartowania, wysokość słupa cieczy w zbiorniku, prędkość obrotowa silnika, itp.

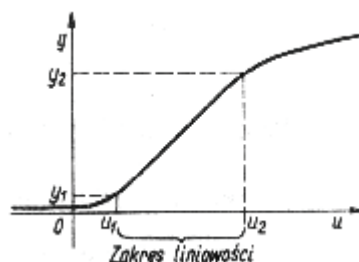
Skuteczność sterowania dowolnego układu wymaga poznania jego zachowania się w czasie, czyli znajomości odpowiedzi na pytanie, jakie są skutki działania w układzie określonej przyczyny. Każdy układ fizyczny, którego zachowanie zmienia się w czasie nazywamy układem dynamicznym. Układy automatyki są w większości układami dynamicznymi. Rozpatruje się ich właściwości, podobnie jak elementów automatyki, podając na ich wejście standardowe sygnały wejściowe i obserwuje ich odpowiedzi na określone wymuszenie. Wyniki badań zależą od liniowości układu lub odstępstw od liniowości. Układ dynamiczny jest liniowy gdy spełnia on zasadę superpozycji, a równanie różniczkowe opisujące układ jest liniowe. Właściwie układy liniowe nie istnieją, np. prawo Ohma dla rezystora jest prawdziwe tylko dla pewnych wartości prądów i napięć, a po przekroczeniu wartości odpowiadającej mocy znamionowej rezystor ulega zniszczeniu.

Dla pełnej oceny właściwości obiektu dynamicznego przeprowadza się badania w stanach ustalonych i przejściowych (nieustalonych). Właściwość układu dynamicznego określona w stanie ustalonym nazywa się charakterystyką statyczną.

Ze względu na kształt charakterystyki statycznej, obiekty regulacji (sterowania) dzielimy na:

- obiekty liniowe,
- obiekty nieliniowe.

Większość obiektów sterowania ma charakterystykę statyczną nieliniową. Analizując nieliniową charakterystykę statyczną (rys.29) możemy jednak określić zakres zmian sygnałów, w którym poszczególne obiekty traktuje się jako liniowe. Dzięki temu, badając obiekty w otoczeniu punktu pracy, zastępujemy charakterystykę krzywoliniową – charakterystyką liniową. Również analiza układów liniowych jest prostsza niż nieliniowych.

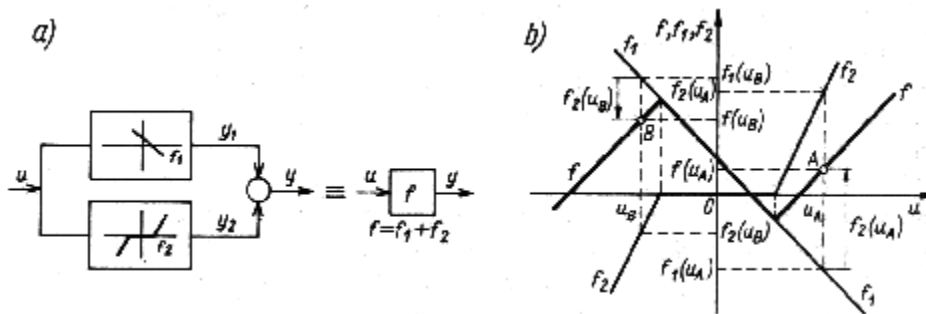


Rys. 29. Ilustracja zakresu liniowości nieliniowej charakterystyki statycznej [10, s. 67]

## Charakterystyki statyczne obiektów regulacji

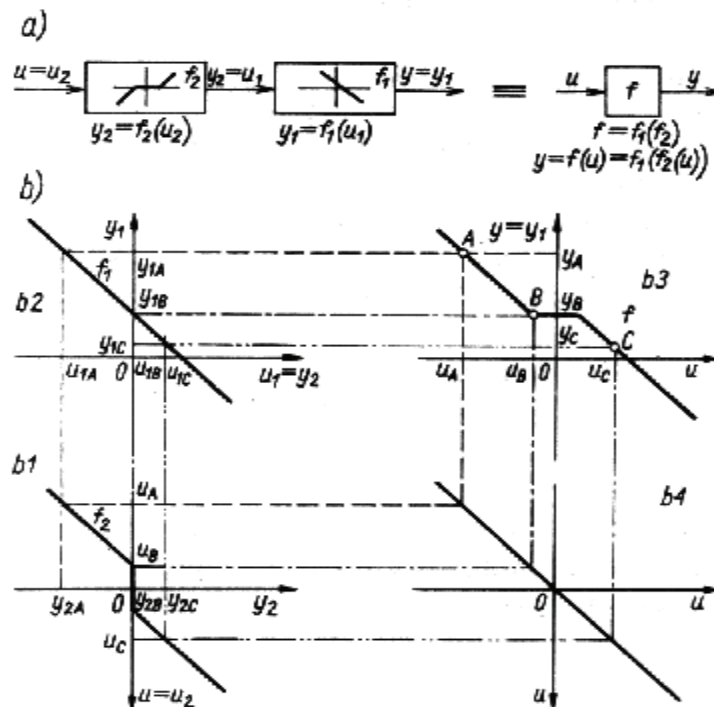
Model statyczny obiektu możemy przedstawić jako szeregowe lub równoległe połączenie podstawowych elementów automatyki. Również elementy składowe mogą być połączone w układ sprzężenia zwrotnego. Analizę takiego modelu statycznego obiektu przeprowadzić możemy posługując modelami przedstawionymi graficznie.

Konstruowanie charakterystyki obiektu, którego dwa elementy są połączone równoległe (rys. 30), sprowadza się do narysowania charakterystyk tych elementów na jednym wykresie oraz ich dodaniu graficznym.



Rys. 30. Równoległe łączenie elementów: a) schemat blokowy, b) wypadkowa charakterystyka statyczna [10, s. 58]

W celu otrzymania charakterystyki wynikowej obiektu, którego dwa elementy są połączone szeregowo (rys. 31), wykonuje się złożenie (superpozycję) charakterystyk tych elementów.

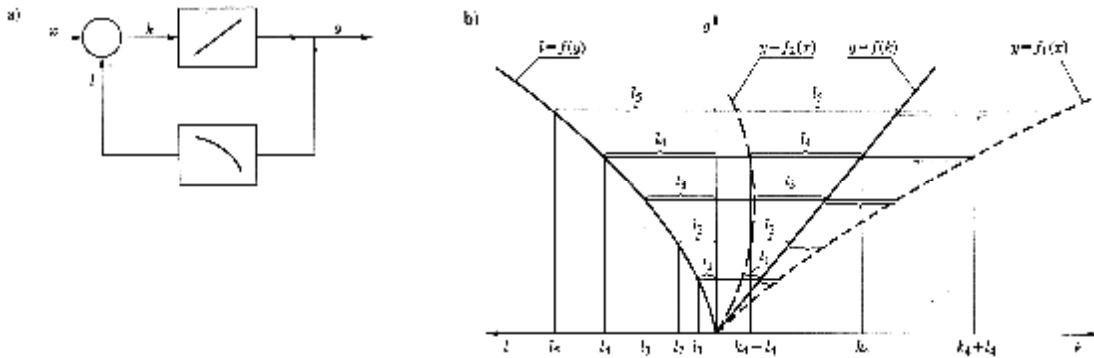


Rys. 31. Szeregowe łączenie elementów: a) schemat blokowy, b) wypadkowa charakterystyka statyczna [10, s. 58]

Jeżeli elementy są połączone przez sprzężenie zwrotne, to charakterystykę wypadkową wyznacza się w zależności od znaku sprzężenia według schematu z rys. 32:

- dla ujemnego sprzężenia zwrotnego krzywa  $y = f_1(x)$ ,
- dla dodatniego sprzężenia zwrotnego krzywa  $y = f_2(x)$ .

- W zależności od znaku sprzężenia, sygnał  $x$  opisany jest zależnościami:
- dla sprzężenia ujemnego
 
$$x = k + l,$$
  - dla sprzężenia dodatniego
 
$$x = k - l.$$



Rys. 32. Układ sprzężenia zwrotnego: a) schemat, b) wypadkowe charakterystyki statyczne przy sprzężeniu dodatnim  $y = f_2(x)$  i ujemnym  $y = f_1(x)$  [8, s. 33]

### Charakterystyki dynamiczne obiektów regulacji

Ze względu na przebieg odpowiedzi skokowej obiekty regulacji możemy podzielić na:

- statyczne (z samowyrównaniem), w których wielkość sterowana (regulowana)  $y$  osiąga stan ustalony w otwartym układzie sterowania (bez pomocy regulatora),
- astatyczne (bez samowyrównania), w których wielkość sterowana  $y$  nie może osiągnąć stanu ustalonego bez regulatora.

Zapewnienie dobrych parametrów układom regulacji stosowanym w przemyśle jest często trudne, gdy w obiekcie występuje opóźnienie, np. związane z transportem składników reakcji procesu chemicznego. Opóźnienie jest tak ważnym składnikiem dynamiki obiektu, że często możemy zaniedbać wpływ innych składników i dlatego typowym modelem dynamicznym obiektu (procesu) przemysłowego jest:

- opóźnienie z inercją opisane równaniem różniczkowym (obiekt statyczny z samowyrównaniem - rys. 33 a):

$$y(t) + T_z \frac{dy(t)}{dt} = k \cdot x(t - T_0),$$

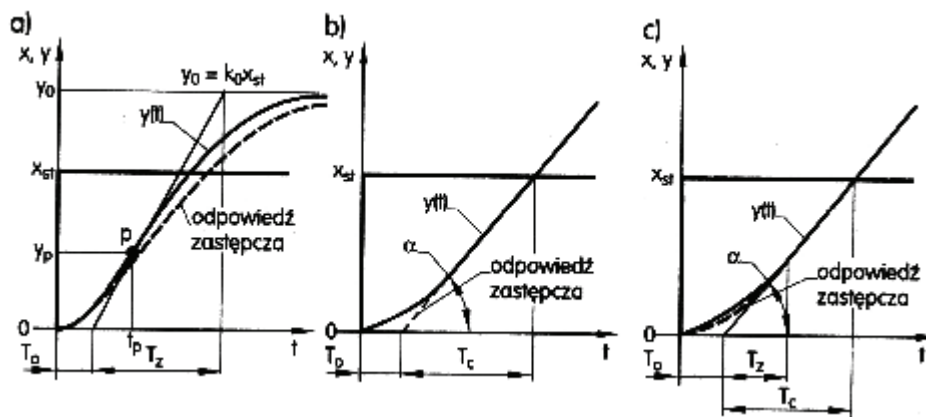
gdzie:

- współczynnik wzmocnienia  $k = y_0/x_{st}$ ,
- zastępczy czas opóźnienia  $T_0$ ,
- zastępcza stała czasowa  $T_z$ ;
- lub opóźnienie z całkowaniem opisane równaniem różniczkowym (obiekt astatyczny bez samowyrównania – rys. 33 b):

$$\frac{dy(t)}{dt} = k \cdot x(t - T_0),$$

gdzie:

- zastępczy czas opóźnienia  $T_0$ ,
- stała całkowania  $T_c = x_{st}/\text{tg } \alpha$  (lub  $k = 1/\text{tg } \alpha$  gdy  $y$  jest inną wielkością fizyczną niż  $x$ ).



Rys. 33. Przebieg odpowiedzi na wymuszenie skokowe: a) obiektu statycznego, b), c) obiektu astatycznego [12, s. 40]

Na rys. 33 c przedstawiono odpowiedź obiektu astatycznego – opóźnienie z inercją i całkowaniem, którą charakteryzują następujące parametry:

- zastępczy czas opóźnienia  $T_0$ ,
- zastępcza stała czasowa części inercyjnej odpowiedzi obiektu  $T_z$ ,
- stała całkowania  $T_c = x_{st} / \operatorname{tg} \alpha$  (lub  $k = 1 / \operatorname{tg} \alpha$  gdy  $y$  jest inną wielkością fizyczną niż  $x$ ).

#### Wyznaczanie charakterystyk obiektów dynamicznych

Charakterystyki statyczną i dynamiczną obiektu można wyznaczyć zarówno analitycznie jak i doświadczalnie.

Właściwości ciągłego elementu, obiektu 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 ( $k = 0, 1, 2, \dots, n$ ;  $l = 0, 1, 2, \dots, m$ ).

W stanie ustalonym wszystkie pochodne są równe zero, dlatego dla stanu ustalonego powyższe równanie przyjmuje postać:

$$a_0 y = b_0 x,$$

a po przekształceniu otrzymujemy równanie charakterystyki statycznej:

$$y = \frac{b_0}{a_0} x.$$

Teoretyczne wyznaczenie właściwości dynamicznych na podstawie odpowiedzi na typowe wymuszenie wymaga rozwiązania powyższego równania różniczkowego. Można to zrobić dwiema metodami:

- metodą klasyczną polegającą na rozwiązaniu równania (obliczeniu pierwiastków równania i wyznaczeniu stałych na podstawie warunków początkowych, wymagana jest znajomość wyższej matematyki),
- metodą operatorową polegającą na zastosowaniu przekształcenia, zwanego przekształceniem Laplace'a, które pozwala zastąpić równanie różniczkowo-całkowe zwykłym równaniem algebraicznym.

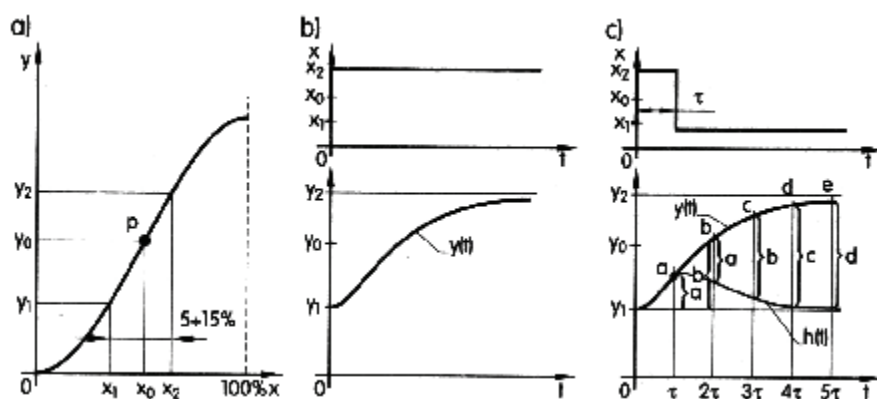


Praktyczne wyznaczenie charakterystyk obiektu wymaga:

- przygotowanie obiektu do badań (ustalenie wielkości wejściowych i wyjściowych oraz zakresów ich zmian),
- doboru aparatury pomiarowej (odpowiedni zakres pomiarowy, inercyjność wskazań przyrządów znacznie mniejsza od inercyjności obiektu),
- montażu aparatury pomiarowej na obiekcie (montaż przyrządów zgodnie z ich dokumentacją techniczno-ruchową),
- przygotowania tabel pomiarowych.

W celu wyznaczenia charakterystyki statycznej (rys. 34 a) dokonuje się, w stanach ustalonych, odczytów wartości sygnału wyjściowego  $y$  dla kolejnych wartości sygnału wejściowego  $x$ . Pomiar należy przeprowadzić w całym zakresie zmian pracy obiektu. Jeżeli zmiany sygnału wejściowego nie następują w sposób ciągły, to należy przyjąć kwant (przyrost w kolejnych odczytach) sygnału. Wartość kwantu może być zmieniana w trakcie pomiaru, np. w obszarach dużych nachyleń charakterystyk kwant powinien być mniejszy.

Charakterystykę odpowiedzi skokowej obiektu wyznacza się w otoczeniu wybranego punktu pracy. Wartość wymuszenia skokowego powinna wynosić 5÷15 % maksymalnej swojej wartości oraz znajdować się na takim poziomie, aby odpowiedź skokowa mieściła się w obszarze punktu pracy. Wartość skoku na wejściu zależy od stopnia nieliniowości charakterystyki statycznej (im bardziej nieliniowa tym wartość skoku mniejsza – rys. 34 a, b). W przypadku badań obiektów podczas ich eksploatacji, do wyznaczenia odpowiedzi skokowej często stosuje się wymuszenie impulsem prostokątnym (rys. 34 c). Wartość impulsu wynosi 15÷25% zakresu zmian wymuszenia. Impuls prostokątny traktowany jest jak dwa sygnały skokowe o takiej samej wartości ale o przeciwnych znakach i opóźnione względem siebie o czas  $\tau$ .



Rys. 34. Charakterystyka obiektów: a) przebieg charakterystyki statycznej, b) odpowiedź obiektu  $y(t)$  na wymuszenie skokowe  $\Delta x = x_1 - x_2$ , c) odpowiedź obiektu  $h(t)$  na wymuszenie impulsowe  $\Delta x = x_1 - x_2$  [12, s. 40]

### 4.3.2. Pytania sprawdzające

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

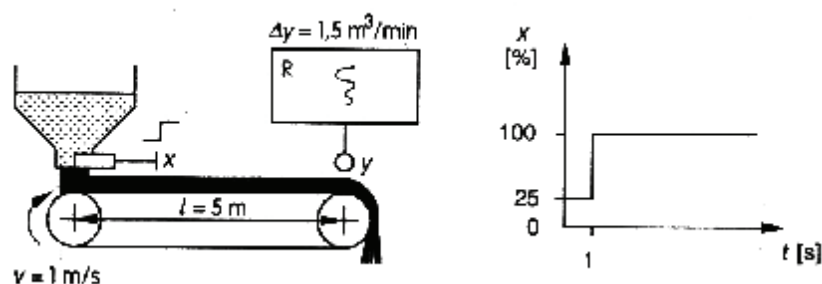
1. Co nazywamy obiektem regulacji?
2. Kiedy układ dynamiczny jest liniowy?
3. Jak wyznacza się charakterystykę statyczną układu dynamicznego?
4. Kiedy możemy traktować obiekty o nieliniowej charakterystyce statycznej jako liniowe?
5. W jaki sposób wyznacza się graficznie model obiektu złożonego z dwóch elementów połączonych równolegle?

6. W jaki sposób wyznacza się charakterystykę graficzną wypadkową dwóch elementów połączonych szeregowo?
7. Jak dzieli się obiekty regulacji ze względu na przebieg odpowiedzi skokowej?
8. W jaki sposób możemy wyznaczyć teoretycznie własności dynamiczne obiektu regulacji?
9. Jakie wymagania należy spełnić, aby wyznaczyć doświadczalnie charakterystyki obiektu?
10. W jaki sposób wyznacza się charakterystykę odpowiedzi skokowej obiektu regulacji?

### 4.3.3. Ćwiczenia

#### Ćwiczenie 1

W obiekcie przedstawionym na rysunku występuje opóźnienie  $T_0$ . Wyjaśnij wpływ czasu  $T_0$  na wielkość regulowaną przy wymuszeniu skokowym. Oblicz czas opóźnienia  $T_0$ . Narysuj wymuszenie skokowe  $x$  i odpowiedź skokową  $y$  obiektu.



Rysunek do ćwiczenia 1. [4 , s. 243]

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

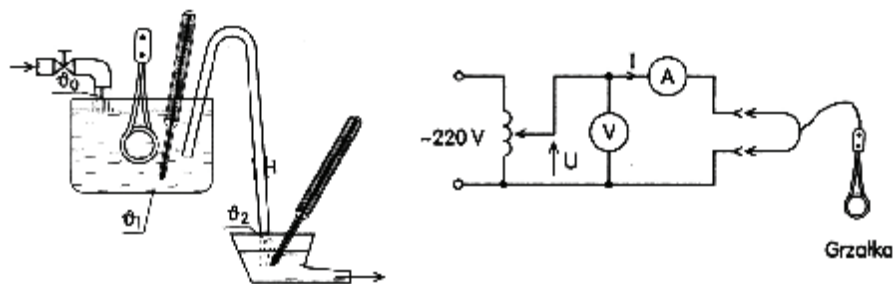
- 1) zapoznać się wiadomościami dotyczącymi układów regulacji,
- 2) przeanalizować działanie przenośnika taśmowego,
- 3) określić model dynamiczny obiektu regulacji,
- 4) wyjaśnić wpływ opóźnienia na wielkość regulowaną przy wymuszeniu skokowym,
- 5) wykonać obliczenie czasu opóźnienia,
- 6) narysować charakterystyki skokową i odpowiedzi skokowej,
- 7) zaprezentować wykonane ćwiczenie,
- 8) dokonać oceny ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

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

#### Ćwiczenie 2

Badanie układu dynamicznego, który jest przedstawiony na rysunku poniżej. Określ użyteczny zakresu liniowości podanego układu oraz podaj właściwości dynamiczne na podstawie charakterystyki skokowej.



Rysunek do ćwiczenia 2. [6, s. 35]

### Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

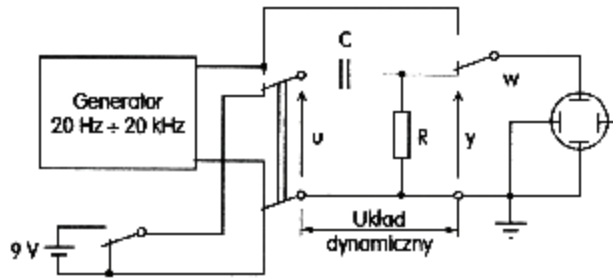
- 1) zapoznać się z wiadomościami dotyczącymi wyznaczania charakterystyk statycznych i dynamicznych obiektów regulacji,
- 2) zapoznać się z instrukcją do ćwiczenia,
- 3) zapoznać się z aparaturą pomiarową oraz badanym obiektem,
- 4) zmontować badany układ na podstawie schematu,
- 5) określić jakie współrzędne charakteryzują stan badanego układu dynamicznego,
- 6) wyznaczyć charakterystykę statyczną układu dynamicznego jako zależność  $v_2 = f(P)$ ,
- 7) wyjaśnić czy na podstawie otrzymanej charakterystyki można stwierdzić liniowość badanego układu,
- 8) wybrać liniowy zakres charakterystyki,
- 9) określić wartość skoku sygnału wejściowego odpowiadającego połowie zakresu liniowego charakterystyki statycznej,
- 10) wyznaczyć charakterystykę skokową,
- 11) wyznaczyć z wykresu stałą czasową  $T$  i wzmocnienie układu  $k$ ,
- 12) opracować i zinterpretować otrzymane wyniki,
- 13) zaprezentować efekty swojej pracy,
- 14) dokonać oceny wykonania ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- naczynia z wodą z wymuszonym przepływem,
- wąż gumowy (klucz szklany),
- grzałka o mocy  $P_N = 500 \text{ W}$ ,
- autotransformator,
- termometr szklany o zakresie  $0 \div 100^\circ\text{C}$ ,
- mierniki (woltomierz, amperomierz),
- instrukcja ćwiczenia,
- zeszyt,
- przybory do pisania i rysowania,
- literatura z rozdziału 6 poradnika.

### Ćwiczenie 3

W układzie podanym na rysunku poniżej wyznacz charakterystyki: statyczną i dynamiczne czwórnika RC.



Rysunek do ćwiczenia 3. [6, s. 36]

### Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zapoznać się z wiadomościami dotyczącymi wyznaczania charakterystyk statycznych i dynamicznych obiektów regulacji,
- 2) zapoznać się z instrukcją do ćwiczenia,
- 3) zapoznać się z aparaturą pomiarową,
- 4) zmontować układ według rysunku,
- 5) określić, jakie współrzędne charakteryzują stan badanego układu dynamicznego,
- 6) wyznaczyć charakterystykę statyczną układu dynamicznego,
- 7) wyjaśnić, czy na podstawie otrzymanej charakterystyki można stwierdzić liniowość badanego układu,
- 8) wybrać liniowy zakres charakterystyki,
- 9) określić wartość skoku sygnału wejściowego odpowiadającego połowie zakresu liniowego charakterystyki statycznej,
- 10) wyznaczyć charakterystykę skokową,
- 11) wyznaczyć z wykresu stałą czasową  $T$  i wzmacnienie układu  $k$ ,
- 12) opracować i zinterpretować otrzymane wyniki,
- 13) zaprezentować efekty swojej pracy,
- 14) dokonać oceny wykonania ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- generator,
- oscyloskop,
- wyłącznik,
- czwórnik RC,
- bateria 9V,
- instrukcja do ćwiczenia,
- przybory do pisania i rysowania,
- literatura z rozdziału 6.

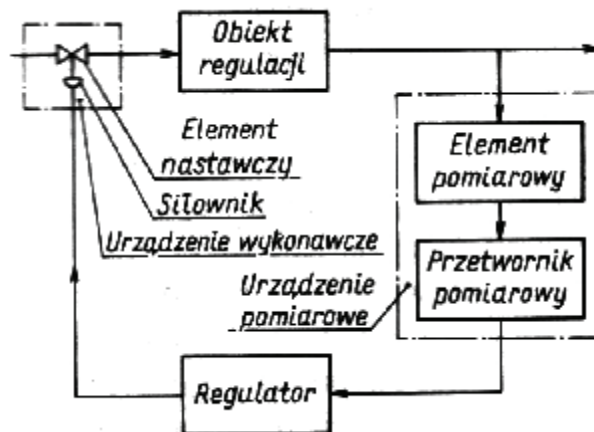
#### 4.3.4. Sprawdzian postępów

<b>Czy potrafisz:</b>	<b>Tak</b>	<b>Nie</b>
1) obliczyć czas opóźnienia przenośnika taśmowego?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2) wyznaczyć charakterystykę statyczną układu dynamicznego?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3) odczytać z przebiegu odpowiedzi skokowej stałą czasową $T$ i wzmocnienie $k$ ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4) podać w jaki sposób wyznacza się wartość wymuszenia skokowego w celu wyznaczenia charakterystyki dynamicznej układu?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5) podać w jaki sposób uzyskuje się charakterystykę skokową w trakcie eksploatacji obiektu?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## 4.4. Układ automatycznej regulacji i jego podstawowe elementy

### 4.4.1. Materiał nauczania

Układ automatyki powstaje z połączenia elementów i urządzeń w pewien zespół wykonujący określone zadanie (rys. 35).



Rys. 35. Schemat blokowy układu regulacji [9, s. 14]

Na schemacie blokowym widać, że do zestawienia układu potrzebne jest urządzenie pomiarowe, urządzenie wykonawcze oraz regulator. Zadaniem urządzenia pomiarowego jest pomiar wielkości regulowanej. Sygnał wyjściowy z tego urządzenia jest dla układu regulacji źródłem informacji o aktualnej wartości wielkości regulowanej. W urządzeniu pomiarowym możemy wyróżnić element pomiarowy oraz przetwornik pomiarowy. Zadaniem czujnika jest bezpośredni pomiar wielkości regulowanej, natomiast przetwornik przekształca zmierzoną wielkość na inną postać, którą można podać na regulator.

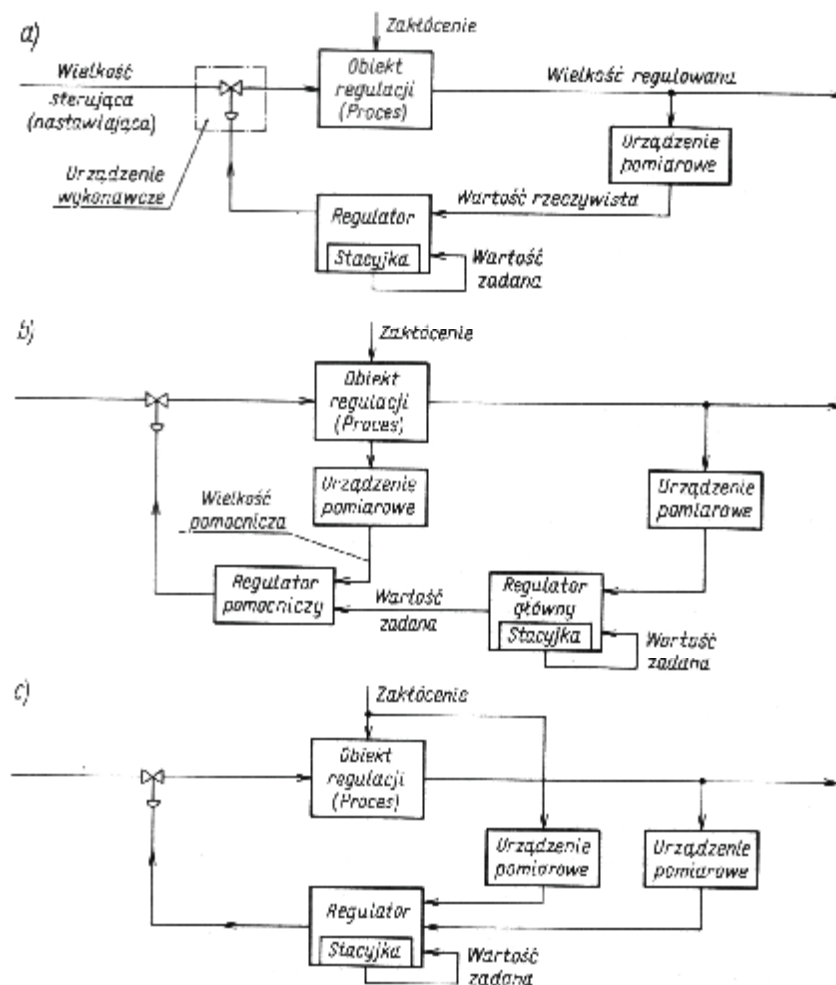
Głównym urządzeniem układu regulacji jest regulator. Zadaniem regulatora jest utrzymywanie wartości wielkości regulowanej maksymalnie zbliżonej do wartości zadanej, zapewniającej najkorzystniejszy przebieg procesu technologicznego. Często w skład regulatora wchodzi zadajnik wartości zadanej. Regulator porównuje obie wartości: zadaną i rzeczywistą regulowaną. W wyniku tego porównania wytwarza sygnał sterujący, którego zadaniem jest takie zadziałanie na obiekt, aby różnicę pomiędzy wartością rzeczywistą a wartością zadaną sprowadzić do zera.

Regulator oddziałuje na obiekt za pośrednictwem urządzenia wykonawczego, składającego się, w tym przypadku, z elementu nastawczego (zaworu) sterującego wartością sterującą i siłownika zapewniającego uzyskanie odpowiedniej siły do przestawienia elementu nastawczego.

Urządzeniami w automatyce są nazywane człony spełniające funkcje bardziej złożone. W skład urządzenia wykonawczego wchodzi elementy nastawcze i napędowe (siłowniki), urządzenia pomiarowego – 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.

## Rodzaje układów automatyki

Do najczęściej spotykanych układów regulacji należą jednoobwodowe układy stabilizacji automatycznej (regulacji stałowartościowej – rys. 36 a), w których wartość zadana w trakcie normalnej pracy układu nie ulega zmianom. Coraz częściej stosowane są też układy z pomiarem zakłóceń (rys. 36 c) oraz układ regulacji kaskadowej (rys. 36 b). W tym ostatnim układzie są dwa regulatory: regulator główny i regulator pomocniczy. Zadaniem regulatora głównego jest utrzymanie na zadanym poziomie wielkość regulowaną. Regulator pomocniczy natomiast ma utrzymywać taką wartość pewnej wielkości pomocniczej, jaka wynika z zadania realizowanego przez regulator główny. Układ regulacji kaskadowej umożliwia więc na eliminację wpływu zakłócenia działającego na wejściu obiektu, nie poprzez bezpośredni pomiar zakłócenia ale poprzez pomiar pomocniczej wielkości wyjściowej, na zmiany której największy wpływ ma to zakłócenie.



Rys. 36. Schemat blokowy układu regulacji: a) jednoobwodowego, b) kaskadowego, c) z pomiarem zakłóceń [9, s. 12]

## Klasyfikacja elementów i urządzeń automatyki

Ze względu na rodzaj energii pomocniczej (zasilającej) elementy i urządzenia możemy podzielić na:

- pneumatyczne,
- hydrauliczne,
- i elektryczne.

Ze względu na funkcje spełniane w układach automatyki możemy je podzielić na:

- pomiarowe (czujniki, przetworniki, zespoły pomiarowe),
- wykonawcze (np. zawory, zasuwy, silniki, siłowniki, elektromagnesy, pompy, regulatory bezpośredniego działania),
- i tzw. części centralnej (regulatory, stacyjki manipulacyjne, rejestratory, bloki matematyczne, sterowniki).

Klasyfikując elementy i urządzenia według sposobu działania dzielimy je na analogowe oraz cyfrowe.

### **Urządzenia pomiarowe w układach automatycznej regulacji**

Urządzenia pomiarowe w układach automatyki powinny charakteryzować szczególną niezawodnością oraz dokładnością działania. Wynika to z faktu, że w układach regulacji urządzenia pomiarowe nie są objęte sprzężeniem zwrotnym i ich błędy nie są eliminowane przez działanie sprzężenia zwrotnego ale w całości przenoszą się na dokładność regulacji.

Zadaniem urządzeń i układów pomiarowych w układach sterowania jest:

- dostarczanie informacji o bieżącej wartości kontrolowanych parametrów,
- rejestrowanie wyników pomiarów,
- wytwarzanie sygnału dla regulatora,
- opracowanie wyników pomiarów,
- sygnalizowanie nadmiernych odchyłek od pożądanej wartości określonych wielkości.

Czujnik jest to element układu pomiarowego, na który bezpośrednio oddziałuje wielkość mierzona. Sygnał wyjściowy czujnika jest funkcją zmian mierzonej wielkości fizycznej. Przetwornik przekształca sygnał wyjściowy czujnika na standardowy sygnał elektryczny lub pneumatyczny, aby umożliwić łączenie układów pomiarowych z innymi urządzeniami wchodzącymi w skład układów regulacji.

Dla aparatury produkowanej w Polsce przyjęto następujące sygnały standardowe:

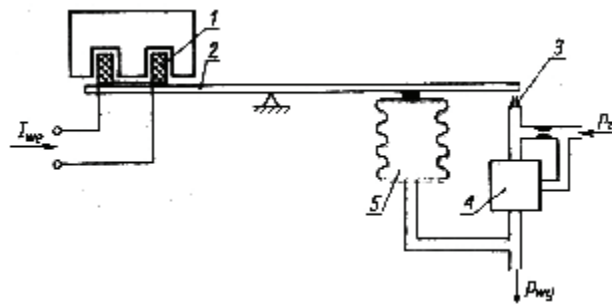
- elektryczny  $0 \div 5 \text{ mA}$ ,  $0 \div 20 \text{ mA}$  lub  $4 \div 20 \text{ mA}$ ,
- pneumatyczny  $20 \div 100 \text{ kP}$ .

Porównując czujniki należy uwzględnić następujące cechy:

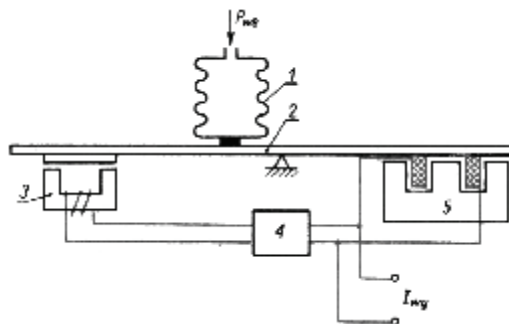
- zakres, czyli dopuszczalny przedział zmian sygnału wyjściowego ze względu na budowę i zasadę działania czujnika,
- jednoznaczność charakterystyki przetwarzania, czyli nieliniowość (największe odchylenie od teoretycznej linii prostej) oraz niejednoznaczność (histereza charakterystyki statycznej) muszą mieścić się w dopuszczalnych granicach,
- czułość, która ma istotny wpływ na dokładne przetwarzanie i przesyłanie informacji,
- odporność na zakłócenia,
- stałość charakterystyki w czasie,
- mała bezwładność, szczególnie istotna przy pomiarach szybkozmiennych,
- duża niezawodność,
- niska cena.

Przetworniki pomiarowe podlegają takim samym wymaganiom jak inne elementy urządzeń pomiarowych, szczególnie jeśli chodzi o klasę dokładności. Są budowane jako układy bez sprzężenia zwrotnego lub jako autokompensacyjne układy ze sprzężeniem zwrotnym. Klasa dokładności przetwornika autokompensacyjnego jest zdecydowanie wyższa i dlatego dąży się do obejmowania nim jak największej części urządzenia pomiarowego. Ważnymi elementami urządzeń pomiarowych są autokompensacyjne przetworniki: elektropneumatyczny (rys. 37) i pneumatyczno-elektryczny (rys. 38). Przetworniki te działają na zasadzie równoważenia sił. W pierwszym przypadku elementem kompensującym jest mieszek, w drugim – elektromagnes.





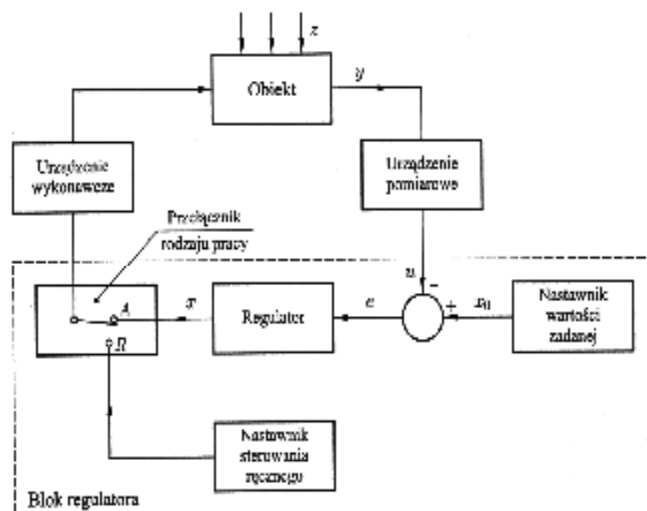
Rys. 37. Schemat budowy przetwornika elektropneumatycznego: 1 – cewka, 2 – dźwignia, 3 – zespół dysza-przysłona, 4 – wzmacniacz pneumatyczny, 5 – mieszek [9, s. 45]



Rys. 38. Schemat budowy przetwornika pneumatyczno-elektrycznego: 1 – mieszek, 2 – dźwignia, 3 – czujnik indukcyjnościowy przesunięcia, 4 – wzmacniacz, 5 – elektromagnes [9, s. 46]

## Regulatory

Regulator to urządzenie, którego zadaniem w układzie regulacji jest wyznaczenie uchybu regulacji ( $\epsilon$ ) 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.39).



Rys. 39. Schemat zamkniętego układu regulacji [8, 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 stacyjki 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**

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

wzmocnienie  $K_p$ . Zamiast wzmocnienia  $K_p$  często używa się jego odwrotności  $x_p = \frac{1}{K_p} \cdot 100\%$ ,

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.

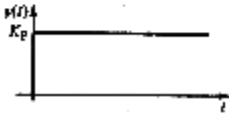
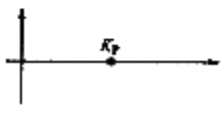
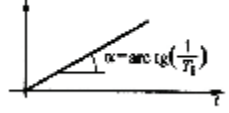

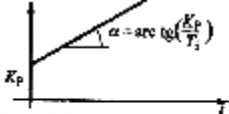

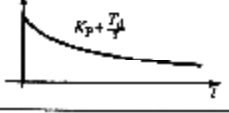
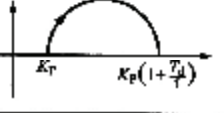
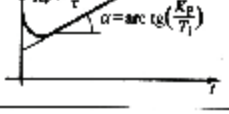
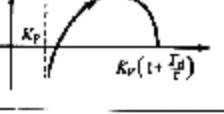
Regulator proporcjonalno-różniczkujący PD powstaje przez dodanie do działania proporcjonalnego działania różniczkującego. Działanie różniczkujące regulatora polega na tym, że wartość sygnału wyjściowego jest proporcjonalna do prędkości zmian uchybu regulacji. Parametrem charakterystycznym regulatora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

$$T_d = \frac{d\varepsilon}{dt} .$$

Transmitancje operatorowe, charakterystyki czasowe i amplitudowo-fazowe podstawowych regulatorów przedstawia tabela 3.

Tabela 3. Podstawowe typy regulatorów przemysłowych [1, s. 34]

Typ regulatora	Transmitancja operatorowa $G_r(s)$	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	$K_p \left(1 + \frac{sT_d}{sT + 1}\right)$		
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.

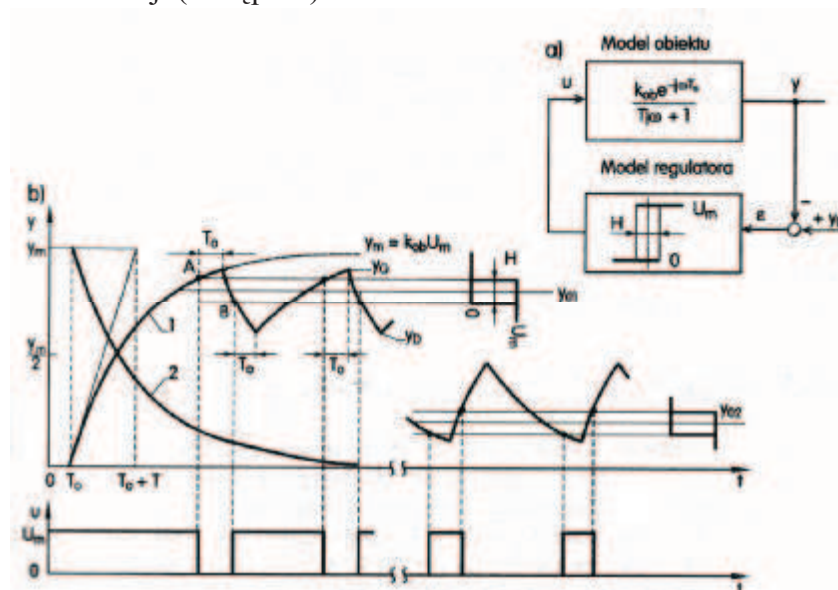
### Regulatory dwustawne

Regulacja dwustawna (dwupołożeniowa) jest najpopularniejszym sposobem regulacji, szczególnie w urządzeniach domowych ale również w urządzeniach przemysłowych. Istotą tej regulacji jest, że na wyjściu regulatora otrzymujemy sygnał sterujący, który może przyjąć tylko

dwa stany, umownie nazywane stanami 0 i 1. Stany te odpowiadają za załączenie lub wyłączenie dopływu energii (załączenie lub wyłączenie wyłącznika) lub materiału do obiektu (zamykanie lub otwieranie zaworu). Regulację dwustawną stosuje się do regulacji obiektów charakteryzujących się dużymi bezwładnościami. Do obiektów takich należą np.: obiekty cieplne (ogrzewane jak i chłodzone), zbiorniki, i in. Parametrami procesów utrzymywanych za pomocą regulacji dwustawnej to m.in.: temperatura, ciśnienie, poziom, napięcie elektryczne.

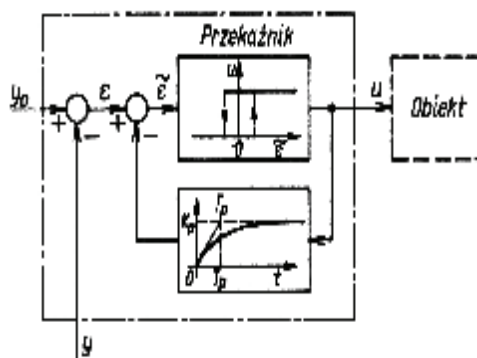
Typowym przykładem regulacji dwustawnej jest proces zmiany temperatury obiektu cieplnego (rys. 40). Obiekt ten możemy opisać za pomocą prostego modelu liniowego, inercji pierwszego rzędu z opóźnieniem o parametrach:

- $k_{ob}$  – wzmacnienie statyczne,
- $T_o$  – czas opóźnienia,
- $T$  – stała czasowa inercji (zastępca).



Rys. 40. Układ regulacji dwustawnej temperatury: a) schemat, b) przebiegi sygnałów [6, s. 205]

Zmniejszenie amplitudy oscylacji można uzyskać albo przez częstszą zmianę sygnału sterującego albo przez zastosowanie tzw. korekcyjnego sprzężenia zwrotnego. W tym celu, wokół regulatora wprowadza się ujemne, dynamiczne sprzężenie zwrotne. Są to najczęściej podgrzewane oporniki lub termoelementy o odpowiednich stałych czasowych. Element korekcyjny ma charakter inercyjny o wzmacnieniu  $K_P$  i stałej czasowej  $T_P$  (rys. 41).



Rys. 41. Układ regulatora dwustanowego z korekcyjnym sprzężeniem zwrotnym [9, s.94]

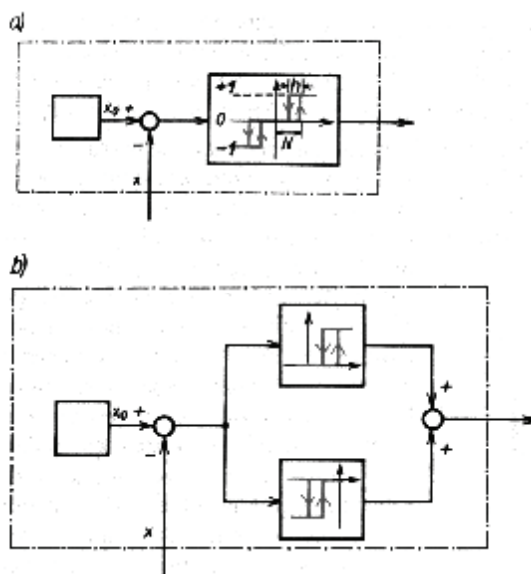
Sygnal wyjściowy elementu dynamicznego korekcyjnego nadąża szybciej za sygnałem wyjściowym przekaźnika niż sygnał wyjściowy obiektu, który reaguje z opóźnieniem. Dzięki ujemnemu sprzężeniu zwrotnemu od układu korekcyjnego do wejścia przekaźnika, w układzie wystąpią oscylacje o okresie zależnym głównie od parametrów przekaźnika i członu korekcyjnego, a w niewielkim stopniu od parametrów obiektu. Wartości  $K_P$  i  $T_P$  są znacznie mniejsze od wartości odpowiednich parametrów obiektu – wzmocnienia  $K_0$  i stałej czasowej  $T_0$ . Sprzężenie zwrotne korekcyjne o małej stałej czasowej wywołuje wzrost częstotliwości oscylacji. Natomiast duża bezwładność obiektu powoduje, że amplituda sygnału wyjściowego  $y$ , wywołana tymi szybkimi zmianami sygnału wejściowego  $u$ , nie będzie duża.

Regulator dwustanowy z korekcyjnym sprzężeniem zwrotnym zmniejsza znacznie amplitudę oscylacji w porównaniu z regulatorem bez korekcji.

### Regulatory trójstawne

Regulatory trójstawne (trójpołożeniowe) charakteryzują się tym, że ich sygnał wyjściowy może przyjmować jedną z trzech wartości, oznaczonych jako  $-1$ ,  $0$  i  $1$ . Wartości te mogą odpowiadać np. sterowaniu napędu elektrycznego – ruch w lewo, hamowanie, ruch w prawo; oraz działaniu – grzanie, stygnięcie, chłodzenie lub – grzanie z mocą znamionową, grzanie z mocą mniejszą niż znamionowa, stygnięcie.

Funkcję regulatora trójstawnego pełni przekaźnik trójpołożeniowy (rys. 42 a). Często w rozwiązaniach praktycznych zamiast elementu trójstawnego stosowane są dwa elementy dwustanowe (po zsumowaniu ich charakterystyk otrzymuje się charakterystykę elementu trójstawnego – rys.42 b).



Rys. 42. Schemat blokowy regulatora trójstawnego: a) z elementem trójstawnym, b) z dwoma elementami dwustanowymi [9, s. 235]

### Regulatory krokowe

Regulatory trójstawne, podobnie jak wcześniej omówione regulatory dwustawne, mogą być wyposażone w układy korekcyjne. Regulatorem krokowym nazywamy układ złożony z regulatora trójstawnego objętego korekcyjnym ujemnym inercyjnym sprzężeniem zwrotnym oraz z silnika.

### Urządzenia wykonawcze

Zadaniem urządzeń wykonawczych w układzie regulacji jest takie oddziaływanie na strumieniu energii lub materiałów, aby został zrealizowany zamierzony przebieg procesu. W odpowiedzi na sygnał wyjściowy z regulatora zmieniają one wartość wielkości nastawiającej.

W skład urządzeń wykonawczych wchodzi:

- element nastawczy,
- element napędowy,
- wzmacniacz mocy.

To właśnie element nastawczy wpływa bezpośrednio na wejściowy strumień materiałowo-energetyczny. Elementami nastawczymi w układach regulacji procesów przemysłowych są: zawory, zasowy, przepustnice, żaluzje, dozowniki, pompy o zmiennym wydatku, dławiki, dzielnika napięcia, transformatory z odczepami, itp.

Elementy napędowe dostarczają energii mechanicznej, która jest niezbędna do przestawienia elementu nastawczego według sygnału podanego z regulatora. Jako elementy napędowe w układach regulacji są stosowane siłowniki, silniki, pompy, elektromagnesy, zespoły napędowe, itp.

#### 4.4.2. Pytania sprawdzające

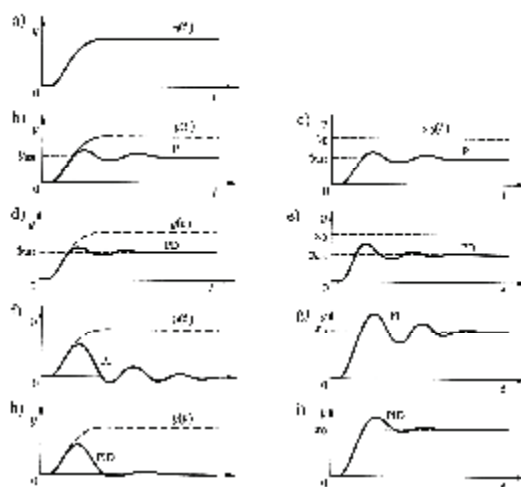
Odpowiadając na pytania, sprawdzisz, czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczeń.

1. Jaką rolę pełni w układzie regulacji urządzenie pomiarowe?
2. Jakie zadania pełni w układzie regulacji urządzenie wykonawcze?
3. Jakie jest zadanie regulatora głównego w układzie regulacji kaskadowej?
4. Czym różni się czujnik od przetwornika pomiarowego?
5. Jaka jest zasada działania przetwornika elektropneumatycznego autokompensacyjnego?
6. Jak klasyfikujemy regulatory?
7. Czym charakteryzują się regulatory P, PI i PD?
8. Na czym polega istota regulacji dwupołożeniowej?
9. W jaki sposób można uzyskać zmniejszenie amplitudy oscylacji sygnału regulowanego w regulacji dwustawnej?
10. Czym charakteryzuje się regulator trójstawny i gdzie znalazł zastosowanie?

#### 4.4.3. 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. [10, s. 81]

## Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

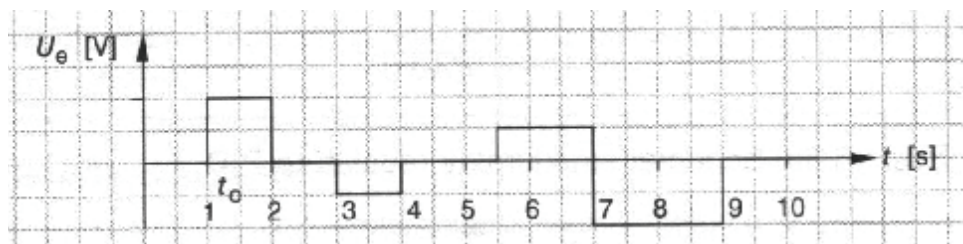
- 1) zapoznać się z materiałem teoretycznym o regulatorach P, PD, PI i PID,
- 2) zorganizować stanowisko pracy do wykonania ćwiczenia,
- 3) rozpoznać na podstawie odpowiedzi skokowej obiekt regulacji (model dynamiczny),
- 4) zinterpretować wpływ poszczególnych regulatorów (ich członów) na tłumienie zakłócenia 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.

## 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. [4, s. 252]

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

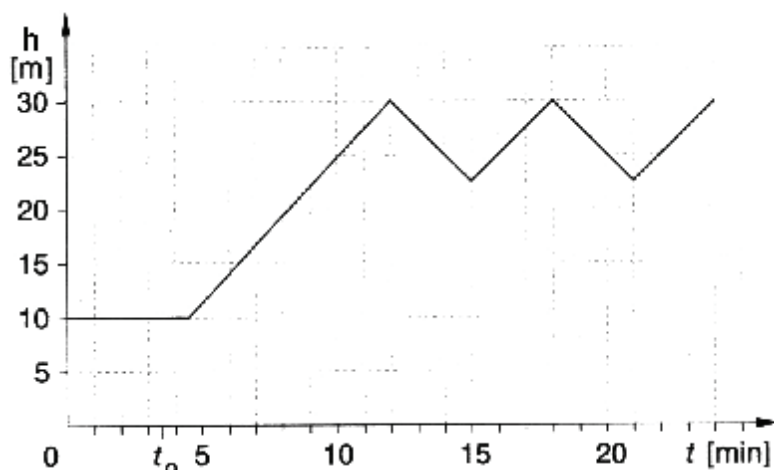
- 1) zapoznać się z materiałem teoretycznym o regulatorze PI i jego nastawach,
- 2) zorganizować stanowisko pracy do wykonania ćwiczenia,
- 3) narysować przebieg sygnału sterującego,
- 4) zaprezentować wykonane ćwiczenie,
- 5) dokonać oceny poprawności wykonania ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

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

## Ćwiczenie 3

Rysunek przedstawia przebieg czasowy poziomu cieczy w zbiorniku w układzie regulacji z regulatorem dwustawnym. Wiedząc, że proces regulacji rozpoczął się w chwili  $t_0$ , oblicz częstotliwość przełączania regulatora.



Rysunek do ćwiczenia 1. [4, s.246]

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zapoznać się materiałem teoretycznym o regulacji dwustawnej,
- 2) zorganizować stanowisko pracy do wykonania ćwiczenia,
- 3) przerysować podany rysunek na kartkę papieru milimetrowego,
- 4) odczytać z rysunku czas opóźnienia obiektu regulacji,
- 5) określić górną i dolną wartość przełączania regulatora,
- 6) obliczyć szerokość pętli histerezy,
- 7) określić czas włączenia i wyłączenia regulatora,
- 8) obliczyć częstotliwość przełączania regulatora,
- 9) zaprezentować wykonane ćwiczenie,
- 10) dokonać oceny poprawności wykonania ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- zeszyt,
- kartki papieru milimetrowego,
- przybory do pisania i rysowania,
- literatura z rozdziału 6.

#### 4.4.4. Sprawdzian postępów

**Czy potrafisz:**

- |                                                                                                                               | <b>Tak</b>               | <b>Nie</b>               |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1) zinterpretować wpływ własności dynamicznych regulatorów P, PD, PI i PID na tłumienie zakłóceń na wejściu układu regulacji? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 2) zinterpretować wpływ własności dynamicznych regulatorów P, PD, PI i PID na właściwości dynamiczne układu regulacji?        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3) narysować przebieg sygnału sterującego regulatora PI na podstawie przebiegu uchybu regulacji?                              | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 4) wyznaczyć na podstawie przebiegu regulacji dwupołożeniowej częstotliwość przełączania regulatora dwustawnego?              | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |



## 4.5. Sterowniki PLC i ich programowanie

### 4.5.1. Materiał nauczania

#### Zasada działania sterownika SPS z programowalną pamięcią

Sterowanie jest procesem, w którym jedna lub kilka wielkości wejściowych oddziałują na wielkości wyjściowe. Oddziaływanie zależy od właściwości układu sterowania. Sterowanie odbywa się w układzie otwartym. Celem sterowania jest osiągnięcie określonego stanu końcowego układu, przy czym stan ten nie wpływa na proces sterowania.

Sygnały wejściowe sterownika są sygnałami cyfrowymi (np. sygnałowi 1 odpowiada napięcie stałe o wartości +24V a sygnałowi 0 napięcie 0V). Sterownik SPS pracuje zgodnie z określonym programem sterowniczym. Program ten zawiera ciąg rozkazów logicznych, które sterują pracą urządzeń. Są one tworzone przy użyciu komputera lub programatorów ręcznych. Za pomocą komputera można tworzyć program sterowniczy w postaci schematu stykowego KOP, schematu logicznego FUP lub listy rozkazów AWL ( przy użyciu programatorów ręcznych tylko w postaci listy rozkazów AWL).

Programowanie sterownika polega na wpisaniu do jego pamięci programu sterowniczego, w postaci listy pojedynczych rozkazów (lista rozkazów AWL). Kolejność wpisywania rozkazów wynika z zasad programowania danego sterownika. Rozkaz ( rys. 43) składa się z kilku części:

Adres	Rozkaz		
	Operacja	Operand	
		Symbol	Parametr
0000	L	E	0.01

Rys. 43. Przykład rozkazu [14, s. 6]

- adresu – określa numer miejsca w pamięci sterownika rozkazu (sterownik wykonuje rozkazy w kolejności wynikającej z adresów),
- operacji – określa zadanie sterownika (rodzaj funkcji logicznej),
- operandu, składającego się z symbolu i parametru; podaje czego ma dotyczyć dana operacja ( określa sygnały wejściowe i wyjściowe sterownika powiązane ze sobą funkcjami logicznymi),
- symbolu – określa rodzaj operandu,
- parametru – określa konkretny parametr.

Dodatkowo, dla lepszego zrozumienia programu, można dodać komentarz do każdego wiersza programu. Lista rozkazów AWL zawiera określoną liczbę kolejno ponumerowanych wierszy, którą dzieli się na segmenty.

Operacje określają połączenia sygnałów niezbędne do działania programu. Rozróżnia się połączenia podstawowe i funkcje specjalne.

Przykładowe operacje (rozkazy):

- L Ładuj – tym rozkazem rozpoczyna się każdy program sterowniczy; występuje również po każdym znaku przyporządkowania (=),
- = Przyporządkowanie - wynik funkcji logicznej jest przyporządkowany jednemu z operandów,
- U AND - rozkaz do tworzenia funkcji iloczynu logicznego AND dwóch operandów,
- O OR – rozkaz tworzący funkcję sumy logicznej OR dwóch operandów,
- N NOT - rozkaz ten występuje zawsze w kombinacji z inną operacją i oznacza negację,

- PE Koniec programu - na końcu każdego programu sterowniczego musi znaleźć się ten rozkaz,
- S Set - rozkaz wpisujący stan jedynki logicznej 1 do określonego operandu,
- R Reset - rozkaz wpisujący stan zera logicznego 0 do określonego operandu,
- NOP Operacja zerowa - rozkaz służący jedynie do zarezerwowania miejsca w pamięci sterownika (pusty wiersz).

Przykładowe operandy:

- E Wejście - symbol oznaczający wejście sterownika,
- A Wyjście - symbol oznaczający wyjście sterownika,
- M Merker - symbol komórki pamięci sterownika.

W trakcie pisania programu sterowniczego często powtarzają się jednakowe fragmenty, zawierające określone rozkazy. Są to bloki funkcyjne (moduły), które w trakcie programowania przywołuje się odpowiednim skrótem. Wystarczy tylko określić jego parametry.

Przykładowe moduły:

- T Moduł czasowy - umożliwia realizację opóźnionego włączenia i wyłączenia,
- Z Licznik - umożliwia zliczanie obiektów (zarówno do przodu jak i do tyłu),
- SR Rejestr przesuwany - wykorzystywany do przesuwania w lewo lub prawo informacji o określonej długości,
- MI Moduł impulsowy - wytwarza impuls trwający jeden cykl programowy,
- CP Komparator - umożliwia porównanie ze sobą dwóch wartości.

Lista przyporządkowująca zawiera wykaz wszystkich elementów sterujących i wykonawczych przyłączonych do wejść i wyjść sterownika.

Program sterowniczy sporządzony za pomocą komputera (programatora) przesyłany jest do sterownika i zapamiętywany w jego pamięci. Sterownik z programowalną pamięcią pracuje sekwencyjnie, tzn. że rozkazy programowe są opracowane kolejno jeden po drugim. Pracuje on także cyklicznie powtarzając ciągle opracowywanie rozkazów programowych. Czas cyklu programatora oznacza czas opracowania wszystkich rozkazów zawartych w danym programie.

Ze względu na rodzaj pamięci sterowniki dzielimy na:

- sterowniki swobodnie programowalne z na stałe wbudowaną do sterownika pamięcią RAM,
- sterowniki z wymienną pamięcią, wyposażone w pamięć typu ROM w postaci oddzielnego modułu.

### **Podstawy programowania układów sterowania. Schemat stykowy KOP**

Podstawą schematu stykowego KOP jest schemat rozwinięty układu sterowania stycznikowego. W schemacie stykowym KOP poszczególne gałęzie prądowe przedstawia się poziomo jedna pod drugą (umożliwia to prezentację programu na monitorze komputera oraz jego wydruk na drukarce). W schemacie stykowym KOP stosuje się następujące symbole:

- --][-- jest to symbol niezanegowanego sygnału wejściowego (sygnał 1 jest rozpoznawany przez sterownik jako 1, a sygnał 0 jako 0),
- --]/-- jest to symbol zanegowanego sygnału wejściowego,
- --()-- jest to symbol niezanegowanego sygnału wyjściowego,
- --(/)-- jest to symbol zanegowanego sygnału wyjściowego.

Powyższe symbole po uzupełnieniu adresami operandów stanowią program stykowy KOP.

### **Lista rozkazów AWL**

Do połączenia sygnałów wejściowych sterownika funkcją iloczynu logicznego AND i przyporządkowania wyniku funkcji logicznej do określonego wyjścia sterownika służy program sterowniczy AWL.

### **Lista przyporządkowująca**

Lista przyporządkowująca zawiera wykaz wszystkich elementów sterujących i wykonawczych przyłączonych do wejść i wyjść sterownika. Może ona zawierać krótki

komentarz dotyczący warunków sterowania i ułatwiający zrozumienie działania układu sterowania.

### Schemat funkcyjny FUP

Schematy funkcyjne (logiczne) służą do szybkiego analizowania działań rozbudowanych układów sterowania.

Przykład.

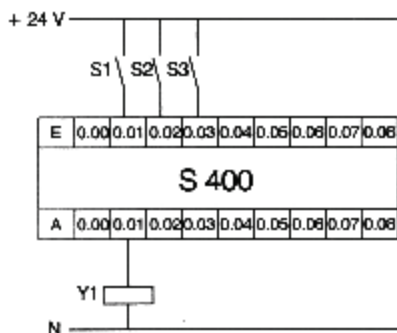
Postawienie zadania. Zawór elektromagnetyczny prasy może otworzyć dopływ sprężonej pary wodnej tylko wtedy, gdy para ma odpowiednie ciśnienie, pokrywa prasy jest zamknięta i wciśnięty został przycisk „Włącz”. Opracować: rozwinięty schemat sterowania stycznikowego, schemat połączeń sterownika, listę przyporządkowującą, FUP, AWL i KOP. [14, s. 9]

Rozwinięty schemat stycznikowy (rys. 44). Włączenie zaworu nastąpi tylko wtedy, gdy wszystkie trzy zestyki zwierne będą zamknięte. Układ realizuje funkcję iloczynu logicznego.



Rys. 44. Rozwinięty schemat stycznikowy [14, s. 9]

Schemat połączeń sterownika (do wejść sterownika przyłączono trzy łączniki - rys. 45).



Rys. 45. Schemat połączeń sterownika [14, s. 10]

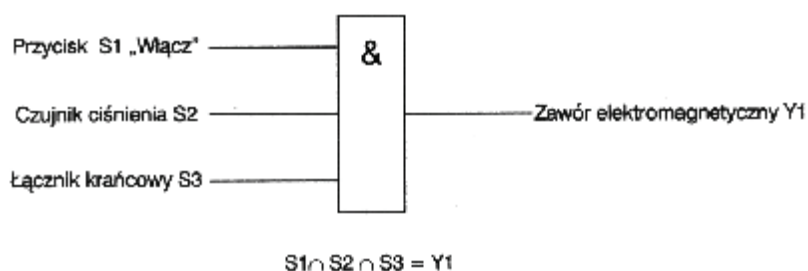
Lista przyporządkowująca (rys. 46).

#### Lista przyporządkowująca

S1	E 0.01	Przycisk „Włącz” (zestyk zwierny)
S2	E 0.02	Czujnik ciśnienia (zestyk zwierny)
S3	E 0.03	Łącznik krańcowy (zestyk zwierny)
Y1	A 0.01	Zawór elektromagnetyczny
Symbol	Operand	Komentarz

Rys. 46. Lista przyporządkowująca [14, s. 11]

Schemat funkcyjny FUP (rys. 47).



Rys. 47. Schemat funkcyjny FUP [14, s. 10]

Lista rozkazów AWL (rys. 48).

Lista rozkazów AWL

Adres	Operacja	Operand	Komentarz
0000	L	E 0.01	Przycisk S1 (zestyk zwierny) „Włącz”
0001	U	E 0.02	Czujnik ciśnienia S2 (zestyk zwierny)
0002	U	E 0.03	Łącznik krańcowy S3 (zestyk zwierny)
0003	=	A 0.01	Zawór elektromagnetyczny Y1
0004	PE		

Rys. 48. Lista rozkazów AWL [14, s. 10]

Schemat stykowy KOP (rys. 49).



Rys. 49. Schemat stykowy KOP [14, s. 11]

## 4.5.2. Pytania sprawdzające

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

1. Z jakich podstawowych części składa się rozkaz?
2. W jaki sposób oznacza się rodzaj operandów?
3. Jaka jest różnica między sterownikiem swobodnie programowalnym a sterownikiem z wymienną pamięcią?
4. W jaki sposób oznacza się kolejność rozkazów programu sterowniczego?
5. W jaki sposób tworzy się listę rozkazów AWL?
6. Jakie informacje zawiera lista przyporządkowująca?
7. Jakie symbole i co one oznaczają, stosuje się na schematach KOP?

### 4.5.3. Ćwiczenia

#### Ćwiczenie 1

Zaprogramuj układ sterowania wyłaczarki.[14, s. 12]

Opis działania układu. Głowicę wyłaczarki można uruchomić tylko wtedy, gdy jest zamknięta osłona ochronna i zostały wciśnięte jednocześnie dwa przyciski sterownicze. Łącznik krańcowy i przyciski sterownicze są zestykami zwiernymi.

Opracuj rozwinięty schemat sterowania stycznikowego, schemat połączeń sterownika, listę przyporządkowującą, FUP, KOP, AWL.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zapoznać się z materiałem dotyczącym programowania sterowników PLC,
- 2) zorganizować stanowisko pracy,
- 3) zapoznać się z treścią zadania,
- 4) narysować rozwinięty schemat sterowania stycznikowego,
- 5) opracować schemat połączeń sterownika
- 6) opracować listę przyporządkowującą FUP, KOP, AWL,
- 7) wydrukować programy,
- 8) zaprogramować sterownik,
- 9) zaprezentować wynik swojej pracy,
- 10) ocenić ćwiczenie.

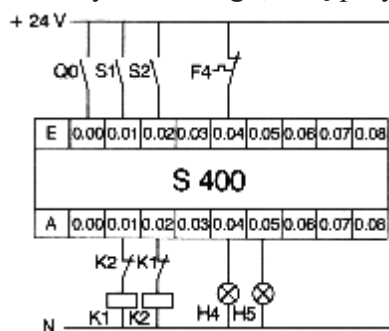
Wyposażenie stanowiska pracy:

- sterownik PLC,
- komputer z oprogramowaniem,
- drukarka,
- instrukcja ćwiczenia,
- papier,
- literatura z rozdziału 6.

#### Ćwiczenie 2

Zaprogramuj stycznikowy układ nawrotny (bez samopodtrzymania).[14, s. 17]

Opis działania układu. Silnik jest chroniony przed przeciążeniem za pomocą przekaźnika termicznego. W układzie należy przewidzieć blokadę przełącznikową i stycznikową. Napięcie zasilania układu sterowania jest włączane przyciskiem stabilnym Q0. Prawe i lewe obroty silnika sygnalizują oddzielne lampki kontrolne. Dany jest schemat połączeń sterownika. Opracuj rozwinięty schemat sterowania stycznikowego, listę przyporządkowującą, FUP, KOP, AWL.



Rysunek do ćwiczenia 2. [14, s. 17]

## Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zapoznać się z materiałem dotyczącym programowania sterowników PLC,
- 2) zorganizować stanowisko pracy,
- 3) zapoznać się z treścią zadania,
- 4) narysować rozwinięty schemat sterowania stycznikowego,
- 5) opracować listę przyporządkowującą FUP, KOP, AWL,
- 6) wydrukować programy,
- 7) zaprogramować sterownik,
- 8) zaprezentować wynik swojej pracy,
- 9) ocenić ćwiczenie.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- sterownik PLC,
- komputer z oprogramowaniem,
- drukarka,
- instrukcja ćwiczenia,
- papier,
- literatura z rozdziału 6.

### 4.5.4. Sprawdzian postępów

**Czy potrafisz:**

- |                                                                                           | <b>Tak</b>               | <b>Nie</b>               |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1) narysować rozwinięty schemat sterowania stycznikowego dla prostych układów sterowania? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 2) opracować listę przyporządkowującą dla prostego układu sterowania?                     | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3) na podstawie danych zadania opracować schemat połączeń sterownika SPS?                 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 4) opracować listę rozkazów AWL dla prostego układu sterowania?                           | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 5) narysować schemat stykowy KOP dla prostego układu sterowania?                          | <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. Gerlach M., Janas R.: Automatyka. WSiP, Warszawa 1998
4. Hörnemann E., Hübscher H., Klaue J., Schierack K., Stolzenburg R.: Elektrotechnika. Instalacje elektryczne i elektronika przemysłowa. WSiP, Warszawa 1998
5. Jastrzębska M.: Podstawy automatyki dla elektroników. WSiP, Warszawa 1986
6. Komor Z.: Pracownia automatyki. WSiP, Warszawa 1996
7. Kordowicz-Sot A.: Automatyka. WSiP, Warszawa 1998
8. Kordowicz-Sot A.: Automatyka i robotyka. Układy regulacji automatycznej. WSiP, Warszawa 1999
9. Kostro J.: Elementy, urządzenia i układy automatyki. WSiP, Warszawa 1997
10. Płoszajski G.: Automatyka. WSiP, Warszawa 1995
11. Schmid D. (red): Mechatronika. REA, Warszawa 2002
12. Siemianko Fr., Gawrysiak M.: Automatyka i robotyka. WSiP, Warszawa 1996
13. Technika sterowników z programowalną pamięcią. WSiP, Warszawa 1998
14. Technika sterowników z programowalną pamięcią. Ćwiczenia. WSiP, Warszawa 1998
15. Węgrzyn S.: Podstawy automatyki. PWN, Warszawa 1972