

4.1.6. Element całkujący

Element całkujący jest opisany równaniem różniczkowym o postaci:

$$\dot{y} = ku, \quad (4.37)$$

z którego wynika transmitancja operatorowa

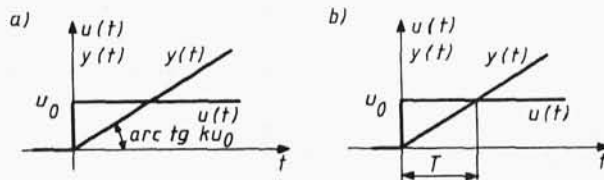
$$G(s) = \frac{k}{s}. \quad (4.38)$$

Równanie charakterystyki statycznej ma postać $u=0$, co oznacza, że stan równowagi statycznej jest możliwy tylko przy zerowej wartości sygnału wejściowego.

Odpowiedź na wymuszenie skokowe $u(t)=u_0 1(t)$, wyrażająca się wzorem

$$y(t) = ku_0 t, \quad (4.49)$$

jest przedstawiona na rys.4.18a.



Rys.4.18. a) odpowiedź elementu całkującego na wymuszenie skokowe, b) sposób wyznaczania stałej czasowej

W przypadku szczególnym, kiedy sygnały wejściowy i wyjściowy oznaczają tę samą wielkość fizyczną, współczynnik k ma wymiar odwrotności czasu. Równanie (4.37) przedstawia się wówczas w postaci

$$T\dot{y} = u, \quad (4.40)$$

której odpowiada transmitancja

$$G(s) = \frac{1}{Ts}, \quad (4.41)$$

gdzie T jest stałą czasową całkowania, którą można wyznaczyć na wykresie odpowiedzi skokowej zgodnie z rys.4.18b.

Charakterystykę amplitudowo-fazową, będącą wykresem transmitancji widmowej

$$G(j\omega) = \frac{1}{Tj\omega} = -j \frac{1}{T\omega}, \quad (4.42)$$

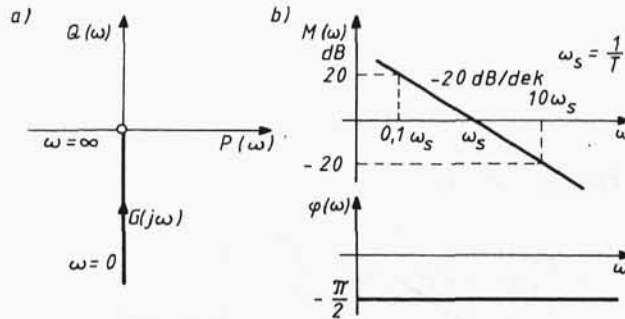
przedstawia rys.4.19a.

Logarytmiczne charakterystyki częstotliwościowe opisane równaniami

$$M(\omega) = -20 \log T\omega, \quad (4.43)$$

$$\varphi(\omega) = -\frac{\pi}{2},$$

są przedstawione na rys.4.19b.



Rys.4.19. Charakterystyki elementu całkującego: a) amplitudowo-fazowa, b) amplitudowa i fazowa

Przykład 4.6

Przykładem elementu całkującego jest idealny kondensator (bez upływności), jeżeli za wymuszenie przyjąć natężenie prądu i , a za odpowiedź - napięcie U na tym kondensatorze.

Jak wiadomo, napięcie U na kondensatorze o pojemności C jest związane z prądem i zależnością

$$\dot{U} = \frac{1}{C} i.$$

Stąd transmitancja operatorowa wyraża się wzorem

$$G(s) = \frac{U(s)}{I(s)} = \frac{k}{s},$$

gdzie: $k = \frac{1}{C}$.

Innym typowym przykładem elementu całkującego jest licznik samochodowy, jeżeli za wymuszenie przyjąć prędkość kątową koła pojazdu, a za odpowiedź - przebytą przez pojazd drogę.

4.1.7. Element opóźniający

Element opóźniający jest opisany równaniem

$$y(t) = u(t-\tau), \quad (4.44)$$

z którego wynika, że jest on elementem o współczynniku wzmocnienia $k=1$.

Transmitancja operatorowa wyraża się wzorem

$$G(s) = e^{-\tau s}. \quad (4.45)$$

Na rys.4.20a przedstawiono odpowiedź elementu opóźniającego na wymuszenie skokowe, a na rys.4.20b charakterystykę amplitudowo-fazową, tzn. wykres transmitancji widmowej

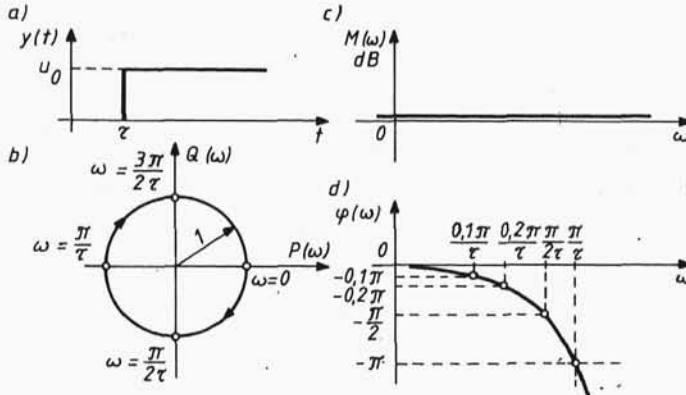
$$G(j\omega) = e^{-j\omega\tau}. \quad (4.46)$$

Charakterystyki logarytmiczne amplitudowe i fazowe, opisane równaniami

$$M(\omega) = 20 \log 1 = 0, \quad (4.47)$$

$$\varphi(\omega) = -\omega\tau, \quad (4.48)$$

są przedstawione na rys.4.20 c i d.



Rys.4.20. Charakterystyki elementu opóźniającego: a) odpowiedź na wymuszenie skokowe, b) charakterystyka amplitudowo-fazowa, c) logarytmiczna charakterystyka amplitudowa, d) logarytmiczna charakterystyka fazowa

Przykład 4.7

Przykładem elementu opóźniającego jest przewód hydrauliczny, jeżeli za wymuszenie przyjąć temperaturę U_1 na początku, a

za odpowiedź - temperaturę U_2 na końcu tego przewodu.

Zależność między temperaturą U_2 a temperaturą U_1 ma postać

$$U_2(t) = U_1(t-\tau), \quad (4.49)$$

gdzie: $\tau=1/v$ jest czasem, w którym ciecz płynąca z prędkością v przebywa drogę równą długości linii 1.

4.2. OPIS ZŁOŻONYCH UKŁADÓW ZA POMOCĄ SCHEMATÓW BLOKOWYCH

4.2.1. Zasady budowy schematów blokowych

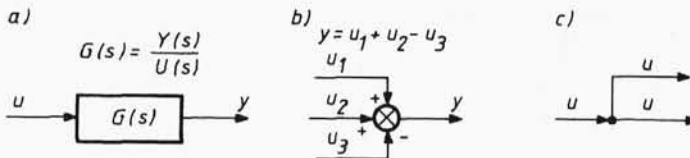
Układy dynamiczne są zwykle przedstawiane graficznie w postaci schematów blokowych, które nie zawierają szczegółów konstrukcyjnych i obrazują jedynie (za pomocą linii ze strzałkami) przepływ sygnałów między poszczególnymi elementami układu.

Schematy blokowe układów liniowych zawierają tylko trzy rodzaje elementów: elementy dynamiczne, węzły sumujące i węzły informacyjne (zaczepowe).

Schemat jednowymiarowego elementu dynamicznego zwany blokiem przedstawiono na rys.4.21a. Oznacza on, że sygnał wyjściowy y jest zależny tylko od sygnału wejściowego u i że zależność ta jest opisana transmitancją

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}. \quad (4.50)$$

Węzeł sumujący przedstawiony przykładowo na rys.4.21b ma jedno wyjście i co najmniej dwa wejścia (w tym konkretnym przypadku - trzy), przy czym sygnał wyjściowy jest sumą sygnałów wejściowych branych z odpowiednimi znakami, oznaczonymi przy każdym wejściu. Węzeł informacyjny (rys.4.21c) ma tylko jedno wejście i co najmniej dwa wyjścia, przy czym wszystkie sygnały wyjściowe są równe sygnałowi wejściowemu.



Rys.4.21. Elementy schematów blokowych układów liniowych: a) jednowymiarowy element dynamiczny, b) węzeł sumujący, c) węzeł informacyjny

Schemat blokowy uzupełniony związkami (mającymi zwykle postać transmitancji) opisującymi zależności między sygnałami wejściowymi i wyjściowymi wszystkich jego bloków stanowi pełny opis matematyczny własności dynamicznych układu. Opis taki zwany niekiedy strukturalnym schematem blokowym jest w wielu przypadkach wygodniejszy do analizy od równoważnego mu układu równań różniczkowych.

Sporządzenie schematu blokowego jest jednak trudnym zadaniem z zakresu modelowania. Wiele trudności i popełnianych przy tym błędów wynika z tendencji do utożsamiania poszczególnych bloków i węzłów z elementami konstrukcyjnymi, podczas gdy stanowią one opis zależności między sygnałami. Sposoby budowania schematów blokowych będą przedstawione przy rozwiązywaniu niektórych przykładów.

Przykład 4.8

Sporządzić schemat blokowy układu pneumatycznego, którego zasadę działania przedstawiono na rys.4.22a. Sygnałem wejściowym jest ciśnienie p gazu doprowadzonego do dwóch komór podzielonych sprężystą membraną, a sygnałem wyjściowym przemieszczenie membrany w . Do lewej komory gaz jest doprowadzany przewodem o dużym przekroju, tj. bez strat ciśnienia, a do komory prawej - poprzez zwężkę, na której występują straty ciśnienia zależne od prędkości przepływu.

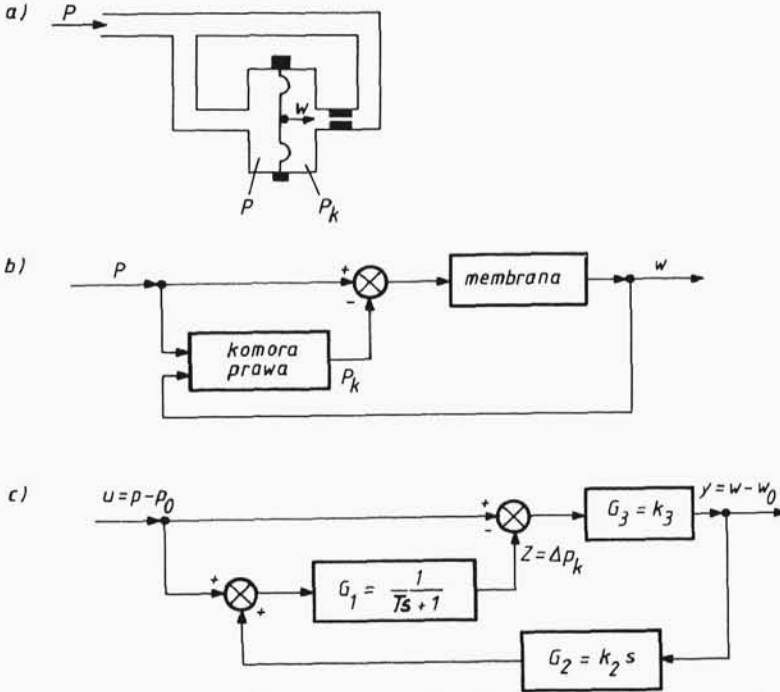
W sposób bardzo ogólny można intuicyjnie przedstawić schemat blokowy układu w postaci pokazanej na rys.4.22b. Oznacza on, że różnica ciśnień $p-p_k$ działając na membranę wywołuje jej przemieszczenie w oraz, że ciśnienie p_k w prawej komorze zależy zarówno od ciśnienia p , jak i od przemieszczenia membrany w . Schemat taki ma charakter poglądowy i nie opisuje własności dynamicznych układu. Aby uzyskać schemat blokowy strukturalny, należy określić ilościowe związki między sygnałami.

Zależność między przemieszczeniem membrany a różnicą ciśnień ma postać równania sił

$$k_s w = S(p-p_k), \quad (4.51)$$

gdzie: k_s - sztywność membrany, S - powierzchnia membrany.

Ciśnienie p_k jest określone przez równanie stanu gazu w komorze prawej



Rys.4.22. Układ pneumatyczny: a) zasada działania, b) schemat poglądowy, c) schemat blokowy strukturalny

$$\rho_k V(w) = mR\theta \quad (4.52)$$

i równanie opisujące zależność strumienia masy gazu przepływającego przez zwężkę od ciśnień p i p_k występujących po obydwu stronach zwężki wyrażone w postaci ogólnej wzorem

$$\frac{dm}{dt} = q(p, p_k), \quad (4.53)$$

gdzie: $V(w)$ - objętość komory, $V(w) = V(w_0) - S\Delta w$, m - masa gazu w komorze, R - stała gazowa, θ - temperatura.

Dla niewielkich odchyłeń od stanu równowagi statycznej, w którym $y = y_0$, $p = p_k = p_0$ i $\frac{dm}{dt} = q_0 = 0$, nieliniowe związki (4.52) i (4.53) można w przybliżeniu zastąpić równaniami zlinearyzowanymi

$$V(w_0)\Delta p_k - p_0 S\Delta w = R\theta\Delta m \quad (4.54)$$

i

$$\frac{dm}{dt} = \left(\frac{\partial q}{\partial p}\right)_0 \Delta p + \left(\frac{\partial q}{\partial p_k}\right)_0 \Delta p_k. \quad (4.55)$$

Z zasady działania układu wynika, iż wzrostowi ciśnienia p o wartość $\Delta p = \text{const}$ odpowiada nowy stan równowagi statycznej, w którym $\Delta p_k = \Delta p$ i $\frac{dm}{dt} = 0$. Oznacza to, że równanie (4.55) można przedstawić w postaci

$$\frac{dm}{dt} = a(\Delta p - \Delta p_k), \quad (4.56)$$

gdzie:

$$a = \left(\frac{\partial q}{\partial p} \right)_0 = - \left(\frac{\partial q}{\partial p_k} \right)_0.$$

Po zróżniczkowaniu względem czasu równania (4.54) i podstawieniu za $\frac{d\Delta m}{dt} = \frac{dm}{dt}$ do wzoru (4.56) otrzymuje się liniową zależność między sygnałami $u = \Delta p$, $z = \Delta p_k$ i $y = \Delta w$ w postaci

$$T \frac{dz}{dt} + z = u + k_2 \frac{dy}{dt}, \quad (4.57)$$

gdzie:

$$T = \frac{V(w_0)}{aR\theta}; \quad k_2 = \frac{p_0 S}{aR\theta}.$$

W równaniu (4.51) można zastąpić sygnały w , p i p_k ich przyrostami, otrzymując związek

$$y = k_3(u - z), \quad (4.58)$$

gdzie:

$$k_3 = \frac{S}{k_s}. \quad (4.59)$$

Wykorzystując równania (4.57) i (4.58), które stanowią przybliżony opis własności dynamicznych układu dla niewielkich zakłóceń, można sporządzić jego strukturalny schemat blokowy. W tym celu dokonuje się transformacji Laplace'a równania (4.57), co daje zależność

$$(Ts+1)Z(s) = U(s) + k_2 s Y(s),$$

z której wynika, że $z = \Delta p_k$ można traktować jako sygnał wyjściowy elementu (bloku) o transmitancji

$$G_1(s) = \frac{1}{Ts+1} = \frac{Z(s)}{U(s)}, \quad (4.60)$$

na którego wejście jest doprowadzony sygnał $v(t)$. Transformata $v(t)$ wyraża się wzorem

$$V(s) = U(s) + G_2(s)Y(s), \quad (4.61)$$

gdzie:

$$G_2(s) = k_2 s. \quad (4.62)$$

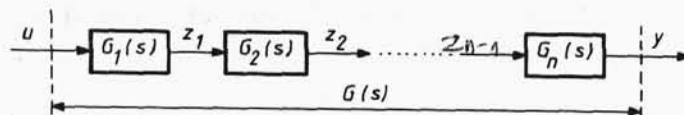
Strukturalny schemat blokowy układu przedstawia rys.4.22c. Równaniom (4.58) i (4.61) odpowiadają na tym schemacie węzły sumujące, a równaniom (4.59), (4.60) i (4.62) bloki o transmitancjach $G_3(s)$, $G_1(s)$ i $G_2(s)$. Wartości parametrów T , k_2 i k_3 można wyznaczyć w sposób przybliżony analitycznie z przedstawionych wyżej zlinearyzowanych związków lub eksperymentalnie, co zapewniłoby większą dokładność.

W przykładzie 4.8 do sporządzenia schematu blokowego układu wykorzystano wyprowadzone wcześniej równania opisujące własności poszczególnych elementów. Przy pewnym doświadczeniu i dobrej znajomości opisu własności elementów rozważanych układów można budować ich schematy blokowe bez odwoływania się do równań.

4.2.2. Przekształcanie schematów blokowych

Wykorzystując strukturalny schemat blokowy, można łatwo wyznaczyć transmitancję całego układu. Sprowadza się to do kolejnego upraszczania schematu blokowego, aż do zastąpienia go jednym elementem zastępczym. Wymaga to poznania reguł wyznaczania transmitancji elementów zastępczych dla typowych połączeń: szeregowego, równoległego i połączenia ze sprzężeniem zwrotnym.

Schemat połączenia szeregowego przedstawiono na rys.4.23. Przebieg sygnałów w takim układzie odbywa się tylko w jednym kierunku, co oznacza że sygnał z_k na wyjściu k -tego elementu zależy tylko od transmitancji $G_k(s)$ i sygnału z_{k-1} , nie zależy natomiast od tego, czy sygnał z_k jest doprowadzany czy też nie jest doprowadzany na wejście elementu o numerze $k+1$. W związku z tym można napisać



Rys.4.23. Schemat szeregowego połączenia elementów

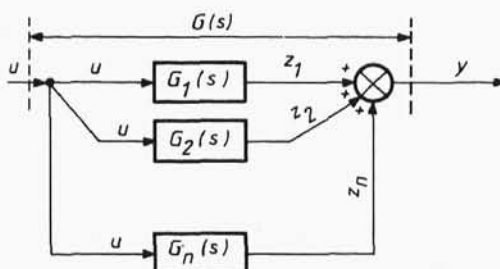
$$G_1(s) = \frac{Z_1(s)}{U(s)}; \quad G_2(s) = \frac{Z_2(s)}{Z_1(s)}; \quad \dots; \quad G_n(s) = \frac{Y(s)}{Z_{n-1}(s)},$$

a stąd

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = G_1(s)G_2(s)\dots G_n(s). \quad (4.63)$$

Transmitancja układu elementów połączonych szeregowo jest więc równa iloczynowi transmitancji poszczególnych elementów. Reguła ta odnosi się zarówno do transmitancji operatorowych, jak i widmowych.

Przy połączeniu równoległym (rys.4.24) ten sam sygnał u jest doprowadzany na wejście wszystkich elementów, których sygnały wyjściowe dodają się następnie w węźle sumującym. Transformata sygnału wyjściowego całego układu wyraża się więc wzorem



Rys.4.24. Schemat równoległego połączenia elementów

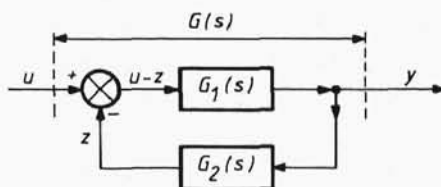
$$Y(s) = Z_1(s) + Z_2(s) + \dots + Z_n(s) = \sum_{i=1}^n G_i(s)U(s),$$

a stąd

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \sum_{i=1}^n G_i(s). \quad (4.64)$$

Przy połączeniu równoległym transmitancja ogólna układu jest więc sumą (z uwzględnieniem znaków) transmitancji poszczególnych elementów.

Schemat blokowy połączenia dwóch elementów ze sprzężeniem zwrotnym przedstawiono na rys.4.25. Element o transmitancji $G_1(s)$ występuje w tzw. torze głównym układu, a element o transmitancji $G_2(s)$ w torze (pętli) sprzężenia zwrotnego. W węźle sumującym usytuowanym na początku toru głównego, do sygnału wejściowego u jest dodawany (lub odejmowany) sygnał z , pochodzący z



Rys.4.25. Schemat blokowy układu z ujemnym sprzężeniem zwrotnym

pętli sprzężenia zwrotnego. Zależnie od znaku, z jakim sygnał z występuje w węzle sumującym, mówimy o dodatnim lub ujemnym sprzężeniu zwrotnym. W przypadku sprzężenia zwrotnego ujemnego (rys.4.25) układ można opisać za pomocą równań

$$G_1(s) = \frac{Y(s)}{U(s)-Z(s)}, \quad G_2(s) = \frac{Z(s)}{Y(s)}.$$

eliminując z tych związków transformatę $Z(s)$, otrzymuje się

$$G_1(s) = \frac{\frac{Y(s)}{U(s)}}{1 - G_2(s) \frac{Y(s)}{U(s)}},$$

a stąd

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{G_1(s)}{1+G_1(s)G_2(s)}. \quad (4.65)$$

W podobny sposób dla sprzężenia zwrotnego dodatniego otrzymujemy

$$G(s) = \frac{G_1(s)}{1-G_1(s)G_2(s)}. \quad (4.66)$$

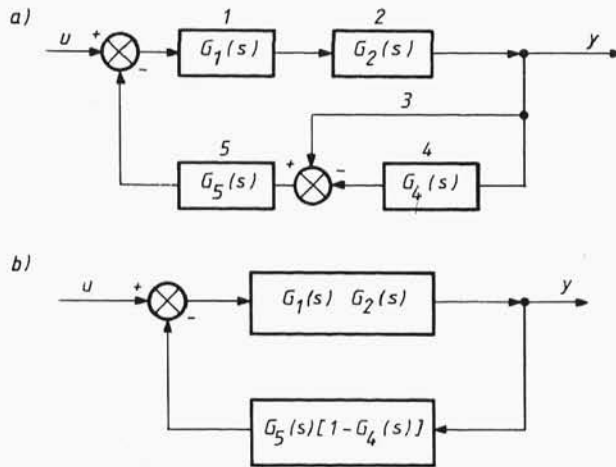
Wykorzystując wzory (4.63)+(4.66) wyprowadzone dla typowych połączeń, można wyznaczyć transmitancje układów bardziej złożonych.

Przykład 4.9

Wyznaczyć transmitancję układu przedstawionego na rys.4.26a. W układzie tym elementy 1 i 2 są połączone szeregowo, można je więc zastąpić jednym elementem o transmitancji

$$G_{12}(s) = G_1(s)G_2(s).$$

Gałąź schematu oznaczona numerem 3 nie zawiera żadnego elementu, co oznacza, że jej sygnał wyjściowy jest taki sam jak wejściowy, czyli że jej transmitancja równa jest jedności $G_3(s)=1$. Jest ona połączona równolegle z elementem 4. Korzystając ze wzoru (4.64) można zastąpić elementy 3 i 4 zastępczym elementem o transmitancji $G_{34}(s)=1-G_4(s)$, który jest połączony szeregowo z elementem 5. Wobec tego fragment schematu utworzony przez elementy 3, 4 i 5 można zastąpić jednym elementem o transmitancji $G_{345}(s)=[1-G_4(s)]G_5(s)$.



Rys.4.26. Schematy blokowe układów

W wyniku przeprowadzonych dotychczas przekształceń schemat całego układu został doprowadzony do prostej postaci przedstawionej na rys.4.26b. Korzystając ze wzoru dotyczącego połączenia ze sprzężeniem zwrotnym ujemnym, otrzymuje się

$$G(s) = \frac{G_1(s)G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)G_5(s)[1-G_4(s)]}$$

Schemat blokowy nie zawsze daje się bezpośrednio podzielić na takie fragmenty, w których występują typowe połączenia pozwalające na korzystanie ze wzorów (4.63)+(4.66). W tych przypadkach transmitancję układu można wyznaczyć na podstawie analizy równań opisujących zależności między transformatami poszczególnych sygnałów lub znacznie prościej przekształcając kolejno schemat blokowy do postaci, w której występują typowe połączenia. Przekształcanie to polega na przesunięciach węzłów informacyjnych i sumujących i jest odpowiednikiem przekształcania równań.

W każdym przypadku przekształcania schematu blokowego spełniony musi być warunek, że w części układu nie podlegającej przekształceniu żadna wielkość nie ulega zmianie (oznacza to, że wejścia i wyjścia przekształconej części schematu muszą pozostać nie zmienione).

Znane są różne sposoby przekształcania (upraszczania) schematów blokowych strukturalnych. Najbardziej uniwersalna jest metoda "krok po kroku" - przez kolejne dokonywanie prostych przekształceń schematu.

Zasady przekształcania schematów strukturalnych w celu ich uproszczenia i określenia transmitancji operatorowej układu nazywane są algebrą schematów blokowych. W tabelicy 4.1 podano zestawienie zasadniczych przykładów takich przekształceń.

Tabela 4.1

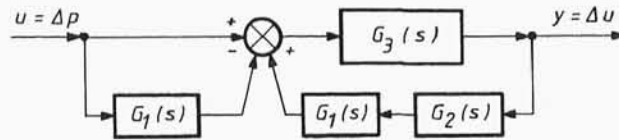
Lp	Schemat pierwotny	Schemat równoważny
1		
2		
3		
4		
5		
6		

Przykład 4.10

Wyznaczyć transmitancję układu rozpatrywanego w przykładzie 4.8, którego schemat blokowy jest przedstawiony na rys.4.22c. Schematu tego nie da się podzielić na fragmenty o typowych po-

łączeniach. Przekształca go się więc, przenosząc węzeł sumujący za element o transmitancji $G_1(s)$, zgodnie z zasadą podaną w wierszu 5 tablicy 4.1 i łącząc obydwa węzły sumujące w jeden. Otrzymany w ten sposób schemat przedstawiono na rys.4.27, w którym fragment o transmitancji $1-G_1(s)$ jest połączony szeregowo z fragmentem o transmitancji

$$\frac{G_3(s)}{1+G_1(s)G_2(s)G_3(s)}.$$



Rys.4.27. Schemat blokowy układu

Uwzględniając wyznaczone w przykładzie 4.8 związki określające transmitancje poszczególnych elementów wyznacza się, z wykorzystaniem wzoru (4.63), transmitancję układu o postaci

$$G(s) = \frac{\left(1 - \frac{1}{Ts+1}\right)k_3}{1 + \frac{1}{Ts+1}k_2sk_3} = \frac{k_3Ts}{(T+k_2k_3)s + 1}.$$

Tak więc rozpatrywany układ ma własności rzeczywistego elementu różniczkującego. Dlatego też jest on często stosowany w przyrządach służących do pomiaru pochodnej ciśnienia względem czasu, a pośrednio do pomiaru prędkości wznoszenia szybowca.

Przekształcanie schematów blokowych nie zawsze polega na ich upraszczaniu. Niekiedy celowe jest nawet postępowanie odwrotne, jeżeli zapewnia przedstawienie układu w postaci dogodnej do analizy. Układ, którego transmitancja może być przedstawiona w postaci iloczynu transmitancji elementów podstawowych wygodnie jest traktować jako szeregowe połączenie tych elementów. Ilustruje to następujący przykład.

Przykład 4.11

Należy wyznaczyć charakterystykę skokową oraz logarytmiczne charakterystyki częstotliwościowe elementu całkującego z inercyjnością zwanego też rzeczywistym elementem całkującym, które-

go transmitancja operatorowa wyraża się wzorem

$$G(s) = \frac{k}{s(Ts+1)}.$$

Wzór ten opisuje również transmitancję szeregowego połączenia dwóch elementów podstawowych:

całkującego o transmitancji

$$G_1(s) = \frac{k}{s}$$

oraz inercyjnego o transmitancji

$$G(s) = \frac{1}{Ts+1}.$$

Odpowiedź elementu całkującego na wymuszenie skokowe $u(t) = u_0 1(t)$ jest przedstawiona na rys.4.18a i wyraża się wzorem

$$y_1(t) = ct 1(t),$$

gdzie: $c = ku_0$.

Przy połączeniu szeregowym, przebieg $y_1(t)$ narastający liniowo jest sygnałem wejściowym elementu o transmitancji $G_2(s)$. Przebieg odpowiedzi tego elementu na wymuszenie liniowo narastające został wyznaczony w przykładzie 4.2 i jest przedstawiony na rys.4.6b. Wyraża się on wzorem

$$y_2(t) = ct - cT(1 - e^{-t/T}).$$

Podstawiając w tym wzorze $c = ku_0$ otrzymuje się poszukiwaną odpowiedź elementu całkującego z inercyjnością na wymuszenie skokowe.

Charakterystyki częstotliwościowe tego elementu wyznacza się łatwo korzystając z zależności

$$G(j\omega) = G_1(j\omega)G_2(j\omega) = |G_1(j\omega)||G_2(j\omega)|e^{j[\varphi_1(\omega) + \varphi_2(\omega)]}$$

z której wynikają związki

$$M(\omega) = M_1(\omega) + M_2(\omega),$$

$$\varphi(\omega) = \varphi_1(\omega) + \varphi_2(\omega).$$

Logarytmiczne charakterystyki częstotliwościowe elementu całkującego z inercyjnością można więc otrzymać przez sumowanie

charakterystyk elementu całkującego (idealnego) oraz elementu inercyjnego.

Przykładem takiego elementu jest obcowzbudny silnik elektryczny prądu stałego, jeżeli za wymuszenie przyjąć napięcie U zasilające twornik, a za odpowiedź kąt α określający położenie wirnika. Uwzględniając tylko rezystancję R , a pomijając jako małą indukcyjność twornika, otrzymuje się równanie

$$U = Ri + k_1 \dot{\alpha},$$

gdzie: i - natężenie prądu twornika, k_1 - stały współczynnik. Przy założeniu, że silnik jest obciążony tylko oporami proporcjonalnymi do prędkości obrotowej, równanie ruchu wirnika ma postać

$$k_2 i = I \ddot{\alpha} + c \dot{\alpha}$$

gdzie: I - moment bezwładności wirnika, k_2 , c - stałe współczynniki.

Po wyeliminowaniu z obydwu równań zmiennej i otrzymuje się po uporządkowaniu równanie różniczkowe

$$I \ddot{\alpha} + \left(c + \frac{k_1 k_2}{R} \right) \dot{\alpha} = \frac{k_2}{R} U,$$

z którego wynika transmitancja operatorowa o postaci

$$G(s) = \frac{k}{s(Ts+1)},$$

gdzie:

$$k = \frac{k_2}{cR+k_1 k_2}; \quad T = \frac{IR}{cR+k_1 k_2}.$$

Bibliografia

1. Kaczorek T.: Teoria sterowania, t.I, PWN, Warszawa 1977.
2. Morecki A., Nazarczuk K.: Zarys miernictwa dynamicznego wielkości mechanicznych. WPW, Warszawa 1981.
3. Żelazny M.: Podstawy automatyki. PWN, Warszawa 1978.