

# Opis układów złożonych za pomocą schematów strukturalnych

dr hab. inż. Krzysztof Patan

## Schematy strukturalne

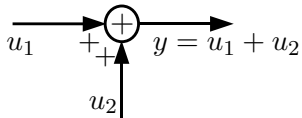
- W przypadku opisu złożonych układów dynamicznych, należy zwrócić uwagę na interpretację fizyczną zjawisk przebiegających w badanym układzie
- Złożony układ dynamiczny opisany jest skomplikowaną transmitancją dlatego wygodniej jest operować schematem strukturalnym
- Schemat strukturalny można uzyskać w sposób analityczny na podstawie równań operatorowych układu bądź w wyniku badań eksperymentalnych
- Schemat strukturalny jest równoważny równaniom opisującym układ dynamiczny

## Podstawowe elementy schematu strukturalnego

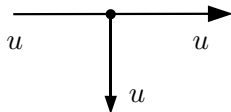
- element dynamiczny



- węzeł sumacyjny

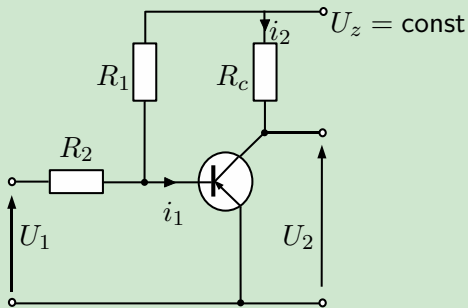


- węzeł zaczepowy

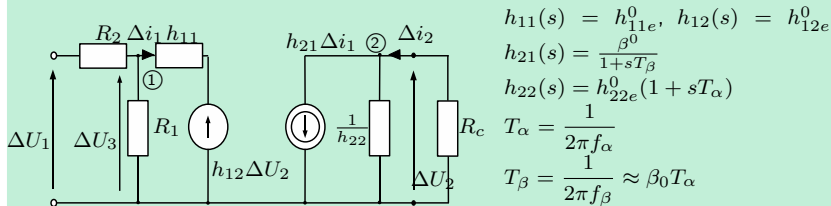


## Przykład 1

Dany jest wzmacniacz tranzystorowy. Wyznaczyć schemat ogólny oraz transmitancję wzmacniacza, zakładając  $R_c = 2k\Omega$ ,  $R_1 = 100k\Omega$ ,  $R_2 = 1k\Omega$



## Schemat zastępczy tranzystora dla małych odchyleń $U_1$ i $U_2$ od punktu pracy



$h_{11e}^0$  – rezystancja wejściowa przy zwartym wyjściu

$h_{12e}^0$  – wsp. sprzężenia zwrotnego przy otwartym wejściu

$\beta^0$  – wsp. wzmocnienia prądowego przy zwartym wyjściu

$h_{22e}^0$  – konduktancja wyjściowa przy otwartym wejściu

$f_\alpha$  – częstotliwość graniczna w układzie OB

$f_\beta$  – częstotliwość graniczna w układzie OE

Stosujemy metodę potencjałów węzłowych dla węzła ① otrzymujemy

$$\Delta U_3(s) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{h_{11}} \right) - \Delta U_1(s) \frac{1}{R_2} - \Delta U_2(s) \frac{h_{12}}{h_{11}} = 0$$

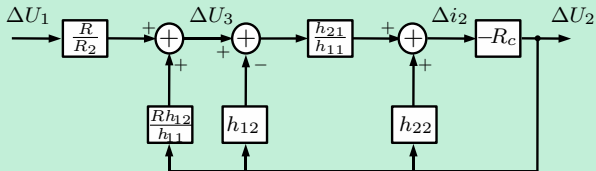
$$\Delta i_1(s) = (\Delta U_3(s) - h_{12} \Delta U_2(s)) \frac{1}{h_{11}}$$

dla węzła ② otrzymujemy

$$\Delta U_2(s) = -\Delta i_2(s) R_c$$

$$\Delta i_2(s) = h_{21} \Delta i_1(s) + \Delta U_2(s) h_{22}$$

### Schemat strukturalny wzmacniacza



gdzie  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{h_{11}}$

wyznaczamy transmitancję  $G(s) = \frac{\Delta U_2(s)}{\Delta U_1(s)}$

po przekształceniach otrzymujemy

$$\Delta U_2(s) \left( 1 + R_c h_{22} - \frac{R_c h_{21}}{h_{11}} \left( h_{12} + \frac{R h_{12}}{h_{11}} \right) \right) = - \frac{R R_c h_{21}}{R_2 h_{11}} \Delta U_1(s) \quad (1)$$

załóżmy następujące parametry tranzystora:  $h_{11e}^0 = 2k\Omega$ ,  $h_{12e}^0 = 10^{-3}$ ,  
 $\beta^0 = 100$ ,  $h_{22e}^0 = 2 \cdot 10^{-4}$ ,  $f_a = 10^6 Hz$

wtedy

$$T_\alpha = 1.59 \cdot 10^{-7} s, \quad T_\beta = \beta^0 T_\alpha = 1.59 \cdot 10^{-5} s \quad R = 625 \Omega$$

$$R \frac{h_{12}}{h_{11}} = \frac{625 \cdot 10^{-3}}{2000} = 0.3 \cdot 10^{-3}, \quad \frac{R}{R_2} = \frac{625}{1000} = 0.625 \gg R \frac{h_{12}}{h_{11}} \approx 0$$

$$\frac{h_{21}}{h_{11}} = \frac{\beta^0}{h_{11}(1 + T_\alpha s)} = \frac{100}{2000(1 + 1.59 \cdot 10^{-5} s)} = \frac{0.5}{1 + 1.59 \cdot 10^{-5}}$$

$$h_{22} = h_{22e}^0(1 + sT_\alpha) = 2 \cdot 10^{-4}(1 + 1.59 \cdot 10^{-7}) \approx 0$$

wyznaczymy transmitancję  $G(s) = \frac{\Delta U_2(s)}{\Delta U_1(s)}$

po przekształceniach otrzymujemy

$$\Delta U_2(s) \left( 1 + R_c h_{22} - \frac{R_c h_{21}}{h_{11}} \left( h_{12} + \frac{R h_{12}}{h_{11}} \right) \right) = - \frac{R R_c h_{21}}{R_2 h_{11}} \Delta U_1(s) \quad (1)$$

załóżmy następujące parametry tranzystora:  $h_{11e}^0 = 2k\Omega$ ,  $h_{12e}^0 = 10^{-3}$ ,  
 $\beta^0 = 100$ ,  $h_{22e}^0 = 2 \cdot 10^{-4}$ ,  $f_a = 10^6 Hz$

wtedy

$$T_\alpha = 1.59 \cdot 10^{-7} s, \quad T_\beta = \beta^0 T_\alpha = 1.59 \cdot 10^{-5} s \quad R = 625 \Omega$$

$$R \frac{h_{12}}{h_{11}} = \frac{625 \cdot 10^{-3}}{2000} = 0.3 \cdot 10^{-3}, \quad \frac{R}{R_2} = \frac{625}{1000} = 0.625 \gg R \frac{h_{12}}{h_{11}} \approx 0$$

$$\frac{h_{21}}{h_{11}} = \frac{\beta^0}{h_{11}(1 + T_\alpha s)} = \frac{100}{2000(1 + 1.59 \cdot 10^{-5} s)} = \frac{0.5}{1 + 1.59 \cdot 10^{-5}}$$

$$h_{22} = h_{22e}^0(1 + sT_\alpha) = 2 \cdot 10^{-4}(1 + 1.59 \cdot 10^{-7}) \approx 0$$



wyznaczymy transmitancję  $G(s) = \frac{\Delta U_2(s)}{\Delta U_1(s)}$

po przekształceniach otrzymujemy

$$\Delta U_2(s) \left( 1 + R_c h_{22} - \frac{R_c h_{21}}{h_{11}} \left( h_{12} + \frac{R h_{12}}{h_{11}} \right) \right) = - \frac{R R_c h_{21}}{R_2 h_{11}} \Delta U_1(s) \quad (1)$$

załóżmy następujące parametry tranzystora:  $h_{11e}^0 = 2k\Omega$ ,  $h_{12e}^0 = 10^{-3}$ ,  
 $\beta^0 = 100$ ,  $h_{22e}^0 = 2 \cdot 10^{-4}$ ,  $f_a = 10^6 Hz$

wtedy

$$T_\alpha = 1.59 \cdot 10^{-7} s, \quad T_\beta = \beta^0 T_\alpha = 1.59 \cdot 10^{-5} s \quad R = 625 \Omega$$

$$R \frac{h_{12}}{h_{11}} = \frac{625 \cdot 10^{-3}}{2000} = 0.3 \cdot 10^{-3}, \quad \frac{R}{R_2} = \frac{625}{1000} = 0.625 \gg R \frac{h_{12}}{h_{11}} \approx 0$$

$$\frac{h_{21}}{h_{11}} = \frac{\beta^0}{h_{11}(1 + T_\alpha s)} = \frac{100}{2000(1 + 1.59 \cdot 10^{-5} s)} = \frac{0.5}{1 + 1.59 \cdot 10^{-5}}$$

$$h_{22} = h_{22e}^0(1 + sT_\alpha) = 2 \cdot 10^{-4}(1 + 1.59 \cdot 10^{-7}) \approx 0$$

wyznaczamy transmitancję  $G(s) = \frac{\Delta U_2(s)}{\Delta U_1(s)}$

po przekształceniach otrzymujemy

$$\Delta U_2(s) \left( 1 + R_c h_{22} - \frac{R_c h_{21}}{h_{11}} \left( h_{12} + \frac{R h_{12}}{h_{11}} \right) \right) = - \frac{R R_c h_{21}}{R_2 h_{11}} \Delta U_1(s) \quad (1)$$

załóżmy następujące parametry tranzystora:  $h_{11e}^0 = 2k\Omega$ ,  $h_{12e}^0 = 10^{-3}$ ,  
 $\beta^0 = 100$ ,  $h_{22e}^0 = 2 \cdot 10^{-4}$ ,  $f_a = 10^6 Hz$

wtedy

$$T_\alpha = 1.59 \cdot 10^{-7} s, \quad T_\beta = \beta^0 T_\alpha = 1.59 \cdot 10^{-5} s \quad R = 625 \Omega$$

$$R \frac{h_{12}}{h_{11}} = \frac{625 \cdot 10^{-3}}{2000} = 0.3 \cdot 10^{-3}, \quad \frac{R}{R_2} = \frac{625}{1000} = 0.625 \gg R \frac{h_{12}}{h_{11}} \approx 0$$

$$\frac{h_{21}}{h_{11}} = \frac{\beta^0}{h_{11}(1 + T_\alpha s)} = \frac{100}{2000(1 + 1.59 \cdot 10^{-5} s)} = \frac{0.5}{1 + 1.59 \cdot 10^{-5}}$$

$$h_{22} = h_{22e}^0(1 + sT_\alpha) = 2 \cdot 10^{-4}(1 + 1.59 \cdot 10^{-7}) \approx 0$$

wyznaczymy transmitancję  $G(s) = \frac{\Delta U_2(s)}{\Delta U_1(s)}$

po przekształceniach otrzymujemy

$$\Delta U_2(s) \left( 1 + R_c h_{22} - \frac{R_c h_{21}}{h_{11}} \left( h_{12} + \frac{R h_{12}}{h_{11}} \right) \right) = - \frac{R R_c h_{21}}{R_2 h_{11}} \Delta U_1(s) \quad (1)$$

załóżmy następujące parametry tranzystora:  $h_{11e}^0 = 2k\Omega$ ,  $h_{12e}^0 = 10^{-3}$ ,  
 $\beta^0 = 100$ ,  $h_{22e}^0 = 2 \cdot 10^{-4}$ ,  $f_a = 10^6 Hz$

wtedy

$$T_\alpha = 1.59 \cdot 10^{-7} s, \quad T_\beta = \beta^0 T_\alpha = 1.59 \cdot 10^{-5} s \quad R = 625 \Omega$$

$$R \frac{h_{12}}{h_{11}} = \frac{625 \cdot 10^{-3}}{2000} = 0.3 \cdot 10^{-3}, \quad \frac{R}{R_2} = \frac{625}{1000} = 0.625 \gg R \frac{h_{12}}{h_{11}} \approx 0$$

$$\frac{h_{21}}{h_{11}} = \frac{\beta^0}{h_{11}(1 + T_\alpha s)} = \frac{100}{2000(1 + 1.59 \cdot 10^{-5} s)} = \frac{0.5}{1 + 1.59 \cdot 10^{-5}}$$

$$h_{22} = h_{22e}^0(1 + sT_\alpha) = 2 \cdot 10^{-4}(1 + 1.59 \cdot 10^{-7}) \approx 0$$

wyznaczymy transmitancję  $G(s) = \frac{\Delta U_2(s)}{\Delta U_1(s)}$

po przekształceniach otrzymujemy

$$\Delta U_2(s) \left( 1 + R_c h_{22} - \frac{R_c h_{21}}{h_{11}} \left( h_{12} + \frac{R h_{12}}{h_{11}} \right) \right) = - \frac{R R_c h_{21}}{R_2 h_{11}} \Delta U_1(s) \quad (1)$$

załóżmy następujące parametry tranzystora:  $h_{11e}^0 = 2k\Omega$ ,  $h_{12e}^0 = 10^{-3}$ ,  
 $\beta^0 = 100$ ,  $h_{22e}^0 = 2 \cdot 10^{-4}$ ,  $f_a = 10^6 Hz$

wtedy

$$T_\alpha = 1.59 \cdot 10^{-7} s, \quad T_\beta = \beta^0 T_\alpha = 1.59 \cdot 10^{-5} s \quad R = 625 \Omega$$

$$R \frac{h_{12}}{h_{11}} = \frac{625 \cdot 10^{-3}}{2000} = 0.3 \cdot 10^{-3}, \quad \frac{R}{R_2} = \frac{625}{1000} = 0.625 \gg R \frac{h_{12}}{h_{11}} \approx 0$$

$$\frac{h_{21}}{h_{11}} = \frac{\beta^0}{h_{11}(1 + T_\alpha s)} = \frac{100}{2000(1 + 1.59 \cdot 10^{-5} s)} = \frac{0.5}{1 + 1.59 \cdot 10^{-5}}$$

$$h_{22} = h_{22e}^0(1 + sT_\alpha) = 2 \cdot 10^{-4}(1 + 1.59 \cdot 10^{-7}) \approx 0$$

wyznaczymy transmitancję  $G(s) = \frac{\Delta U_2(s)}{\Delta U_1(s)}$

po przekształceniach otrzymujemy

$$\Delta U_2(s) \left( 1 + R_c h_{22} - \frac{R_c h_{21}}{h_{11}} \left( h_{12} + \frac{R h_{12}}{h_{11}} \right) \right) = - \frac{R R_c h_{21}}{R_2 h_{11}} \Delta U_1(s) \quad (1)$$

załóżmy następujące parametry tranzystora:  $h_{11e}^0 = 2k\Omega$ ,  $h_{12e}^0 = 10^{-3}$ ,  
 $\beta^0 = 100$ ,  $h_{22e}^0 = 2 \cdot 10^{-4}$ ,  $f_a = 10^6 Hz$

wtedy

$$T_\alpha = 1.59 \cdot 10^{-7} s, \quad T_\beta = \beta^0 T_\alpha = 1.59 \cdot 10^{-5} s \quad R = 625 \Omega$$

$$R \frac{h_{12}}{h_{11}} = \frac{625 \cdot 10^{-3}}{2000} = 0.3 \cdot 10^{-3}, \quad \frac{R}{R_2} = \frac{625}{1000} = 0.625 \gg R \frac{h_{12}}{h_{11}} \approx 0$$

$$\frac{h_{21}}{h_{11}} = \frac{\beta^0}{h_{11}(1 + T_\alpha s)} = \frac{100}{2000(1 + 1.59 \cdot 10^{-5} s)} = \frac{0.5}{1 + 1.59 \cdot 10^{-5}}$$

$$h_{22} = h_{22e}^0(1 + sT_\alpha) = 2 \cdot 10^{-4}(1 + 1.59 \cdot 10^{-7}) \approx 0$$

wyznaczamy transmitancję  $G(s) = \frac{\Delta U_2(s)}{\Delta U_1(s)}$

po przekształceniach otrzymujemy

$$\Delta U_2(s) \left( 1 + R_c h_{22} - \frac{R_c h_{21}}{h_{11}} \left( h_{12} + \frac{R h_{12}}{h_{11}} \right) \right) = - \frac{R R_c h_{21}}{R_2 h_{11}} \Delta U_1(s) \quad (1)$$

załóżmy następujące parametry tranzystora:  $h_{11e}^0 = 2k\Omega$ ,  $h_{12e}^0 = 10^{-3}$ ,  
 $\beta^0 = 100$ ,  $h_{22e}^0 = 2 \cdot 10^{-4}$ ,  $f_a = 10^6 Hz$

wtedy

$$T_\alpha = 1.59 \cdot 10^{-7} s, \quad T_\beta = \beta^0 T_\alpha = 1.59 \cdot 10^{-5} s \quad R = 625 \Omega$$

$$R \frac{h_{12}}{h_{11}} = \frac{625 \cdot 10^{-3}}{2000} = 0.3 \cdot 10^{-3}, \quad \frac{R}{R_2} = \frac{625}{1000} = 0.625 \gg R \frac{h_{12}}{h_{11}} \approx 0$$

$$\frac{h_{21}}{h_{11}} = \frac{\beta^0}{h_{11}(1 + T_\alpha s)} = \frac{100}{2000(1 + 1.59 \cdot 10^{-5} s)} = \frac{0.5}{1 + 1.59 \cdot 10^{-5}}$$

$$h_{22} = h_{22e}^0(1 + sT_\alpha) = 2 \cdot 10^{-4}(1 + 1.59 \cdot 10^{-7}) \approx 0$$

wyznaczymy transmitancję  $G(s) = \frac{\Delta U_2(s)}{\Delta U_1(s)}$

po przekształceniach otrzymujemy

$$\Delta U_2(s) \left( 1 + R_c h_{22} - \frac{R_c h_{21}}{h_{11}} \left( h_{12} + \frac{R h_{12}}{h_{11}} \right) \right) = - \frac{R R_c h_{21}}{R_2 h_{11}} \Delta U_1(s) \quad (1)$$

załóżmy następujące parametry tranzystora:  $h_{11e}^0 = 2k\Omega$ ,  $h_{12e}^0 = 10^{-3}$ ,  
 $\beta^0 = 100$ ,  $h_{22e}^0 = 2 \cdot 10^{-4}$ ,  $f_a = 10^6 Hz$

wtedy

$$T_\alpha = 1.59 \cdot 10^{-7} s, \quad T_\beta = \beta^0 T_\alpha = 1.59 \cdot 10^{-5} s \quad R = 625 \Omega$$

$$R \frac{h_{12}}{h_{11}} = \frac{625 \cdot 10^{-3}}{2000} = 0.3 \cdot 10^{-3}, \quad \frac{R}{R_2} = \frac{625}{1000} = 0.625 \gg R \frac{h_{12}}{h_{11}} \approx 0$$

$$\frac{h_{21}}{h_{11}} = \frac{\beta^0}{h_{11}(1 + T_\alpha s)} = \frac{100}{2000(1 + 1.59 \cdot 10^{-5} s)} = \frac{0.5}{1 + 1.59 \cdot 10^{-5}}$$

$$h_{22} = h_{22e}^0(1 + sT_\alpha) = 2 \cdot 10^{-4}(1 + 1.59 \cdot 10^{-7}) \approx 0$$

wyznaczamy transmitancję  $G(s) = \frac{\Delta U_2(s)}{\Delta U_1(s)}$

po przekształceniach otrzymujemy

$$\Delta U_2(s) \left( 1 + R_c h_{22} - \frac{R_c h_{21}}{h_{11}} \left( h_{12} + \frac{R h_{12}}{h_{11}} \right) \right) = - \frac{R R_c h_{21}}{R_2 h_{11}} \Delta U_1(s) \quad (1)$$

załóżmy następujące parametry tranzystora:  $h_{11e}^0 = 2k\Omega$ ,  $h_{12e}^0 = 10^{-3}$ ,  
 $\beta^0 = 100$ ,  $h_{22e}^0 = 2 \cdot 10^{-4}$ ,  $f_a = 10^6 Hz$

wtedy

$$T_\alpha = 1.59 \cdot 10^{-7} s, \quad T_\beta = \beta^0 T_\alpha = 1.59 \cdot 10^{-5} s \quad R = 625 \Omega$$

$$R \frac{h_{12}}{h_{11}} = \frac{625 \cdot 10^{-3}}{2000} = 0.3 \cdot 10^{-3}, \quad \frac{R}{R_2} = \frac{625}{1000} = 0.625 \gg R \frac{h_{12}}{h_{11}} \approx 0$$

$$\frac{h_{21}}{h_{11}} = \frac{\beta^0}{h_{11}(1 + T_\alpha s)} = \frac{100}{2000(1 + 1.59 \cdot 10^{-5} s)} = \frac{0.5}{1 + 1.59 \cdot 10^{-5}}$$

$$h_{22} = h_{22e}^0(1 + sT_\alpha) = 2 \cdot 10^{-4}(1 + 1.59 \cdot 10^{-7}) \approx 0$$



wyznaczymy transmitancję  $G(s) = \frac{\Delta U_2(s)}{\Delta U_1(s)}$

po przekształceniach otrzymujemy

$$\Delta U_2(s) \left( 1 + R_c h_{22} - \frac{R_c h_{21}}{h_{11}} \left( h_{12} + \frac{R h_{12}}{h_{11}} \right) \right) = - \frac{R R_c h_{21}}{R_2 h_{11}} \Delta U_1(s) \quad (1)$$

załóżmy następujące parametry tranzystora:  $h_{11e}^0 = 2k\Omega$ ,  $h_{12e}^0 = 10^{-3}$ ,  
 $\beta^0 = 100$ ,  $h_{22e}^0 = 2 \cdot 10^{-4}$ ,  $f_a = 10^6 Hz$

wtedy

$$T_\alpha = 1.59 \cdot 10^{-7} s, \quad T_\beta = \beta^0 T_\alpha = 1.59 \cdot 10^{-5} s \quad R = 625\Omega$$

$$R \frac{h_{12}}{h_{11}} = \frac{625 \cdot 10^{-3}}{2000} = 0.3 \cdot 10^{-3}, \quad \frac{R}{R_2} = \frac{625}{1000} = 0.625 \gg R \frac{h_{12}}{h_{11}} \approx 0$$

$$\frac{h_{21}}{h_{11}} = \frac{\beta^0}{h_{11}(1 + T_\alpha s)} = \frac{100}{2000(1 + 1.59 \cdot 10^{-5} s)} = \frac{0.5}{1 + 1.59 \cdot 10^{-5}}$$

$$h_{22} = h_{22e}^0(1 + sT_\alpha) = 2 \cdot 10^{-4}(1 + 1.59 \cdot 10^{-7}) \approx 0$$

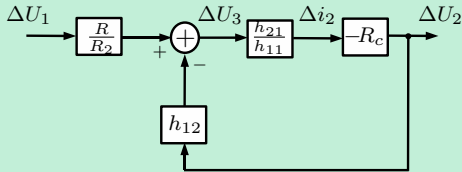
ostatecznie równanie (1) można przepisać w postaci

$$\Delta U_2(s) \left( 1 - \frac{R_c h_{21} h_{12}}{h_{11}} \right) = - \frac{R R_c h_{21}}{R_2 h_{11}} \Delta U_1(s) \quad (2)$$

czyli

$$G(s) = \frac{- \frac{R R_c h_{21}}{R_2 h_{11}}}{1 - \frac{R_c h_{21} h_{12}}{h_{11}}} = \frac{- \frac{62.5}{1 + sT_\beta}}{1 - \frac{0.1}{1 + sT_\beta}} = \frac{-62.5}{0.9 + sT_\beta}$$

Uproszczony schemat strukturalny



## Przykład 2

Wyznaczyć schemat blokowy układu opisanego następującymi równaniami stanu

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}u(k) \\ y(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{cases}$$

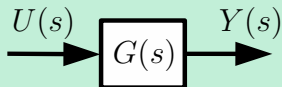
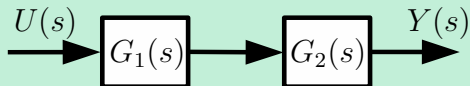
gdzie  $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.1 \\ -0.2 & 0.5 \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix}$

# Przekształcanie schematów strukturalnych

- Sposoby przekształcania (upraszczania) schematów strukturalnych
  - 1 metoda *krok po kroku*
  - 2 metoda przekształcania równań opisujących układ fizyczny
  - 3 metoda mnemotechniczna
  - 4 metoda Masona
- Metody mnemotechniczna i Masona można stosować do ograniczonej klasy układów
- Metoda *krok po kroku* jest metodą uniwersalną – można ją stosować do upraszczania dowolnego schematu strukturalnego
- Przekształcania schematu strukturalnego jest równoważne przekształcaniu układu równań opisujących ten układ
- Przekształcanie schematu może prowadzić do:
  - 1 zmiany układu połączeń elementów
  - 2 uproszczenia schematu

# Podstawowe operacje na schematach blokowych

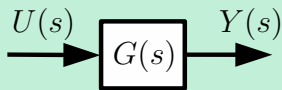
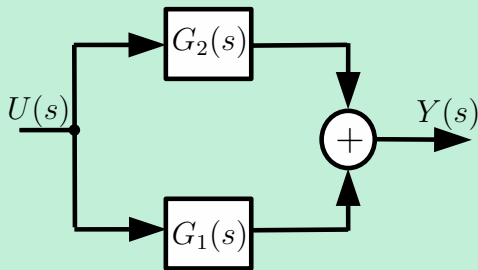
## Połączenie szeregowe



Transmitancja zastępcza

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

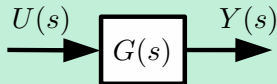
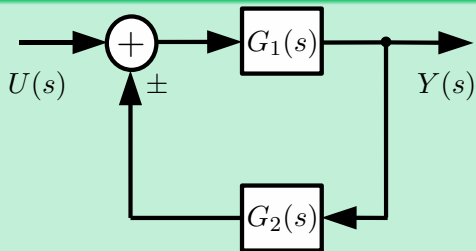
## Połączenie równoległe



Transmitancja zastępcza

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

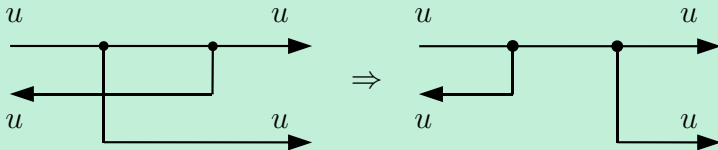
## Połączenie ze sprzężeniem zwrotnym



Transmitancja zastępcza

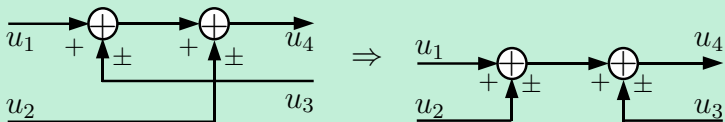
$$G(s) = \frac{G_1(s)}{1 \mp G_1(s)G_2(s)}$$

## Zmiana kolejności węzłów zaczeponych

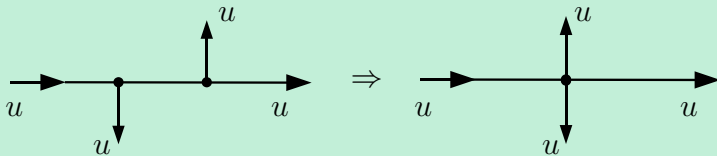




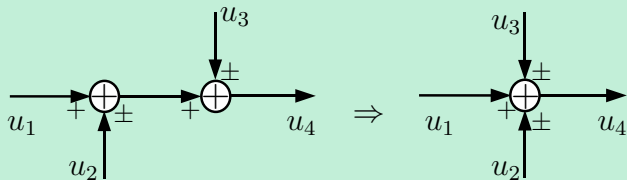
## Zmiana kolejności węzłów sumacyjnych



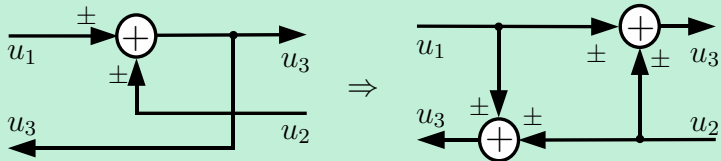
## Łączenie/rozdzielanie węzłów zaczepowych



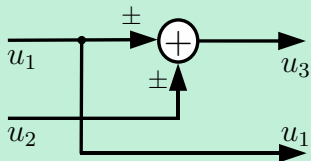
## Łączenie/rozdzielanie węzłów sumujących



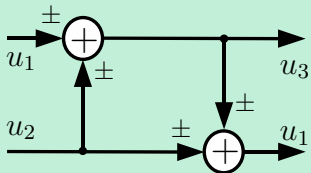
## Przesuwanie węzła zaczepowego przed sumujący



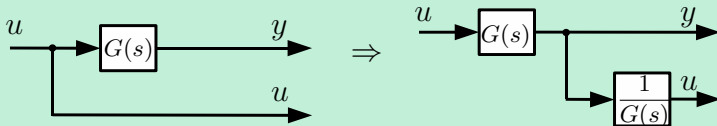
## Przesuwanie węzła sumującego przed zaczepony



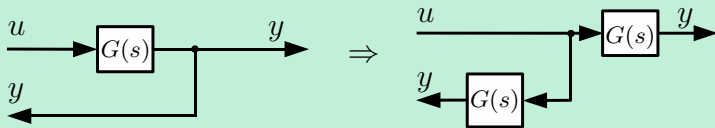
$\Rightarrow$



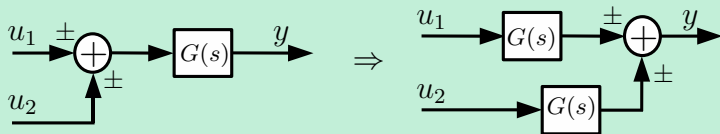
## Przesuwanie węzłów zaczeptowych



## Przesuwanie węzłów zaczeptowych – cd

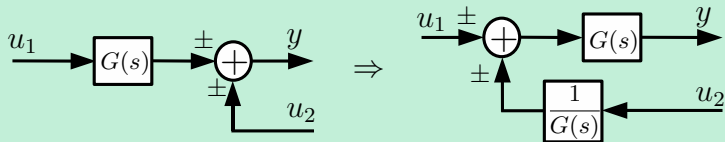


## Przesuwanie węzłów sumacyjnych





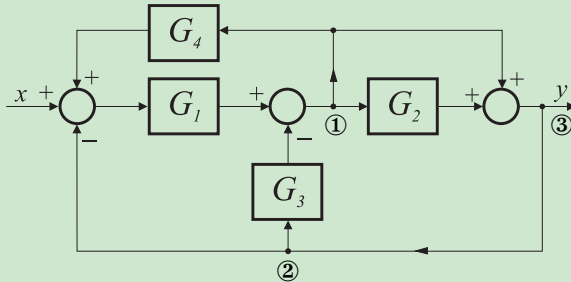
## Przesuwanie węzłów sumacyjnych – cd



# Przykłady

## Przykład 3

Wyznaczyć transmitancję zastępczą poniższego układu

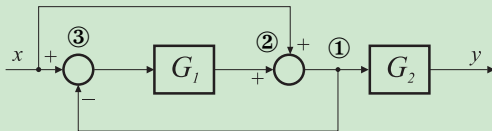


## Rozwiązanie

- 1 rozdzielamy węzeł zaczepekowy ① i liczymy transmitancję połączenia równoległego
- 2 przesuwamy węzeł zaczepekowy ①' za transmitancję  $G_2'$  i liczymy transmitancję połączenia szeregowego
- 3 łączymy węzły zaczepekowe ② i ③, a następnie je rozdzielamy
- 4 liczymy transmitancję połączenia ze sprzężeniem zwrotnym, a następnie połączenia szeregowego
- 5 rozdzielamy węzeł zaczepekowy ③ i liczymy transmitancję połączenia z pełnym sprzężeniem zwrotnym
- 6 wyznaczamy transmitancję zastępczą układu poprzez wyznaczenie transmitancji połączenia ze sprzężeniem zwrotnym

## Przykład 4

Wyznaczyć transmitancję zastępczą poniższego układu



## Rozwiązanie

- 1 przesuwamy węzeł zaczepowy ① za transmitancję  $G_2$
- 2 przesuwamy węzeł sumacyjny ② przed transmitancję  $G_1$  i łączymy węzły sumacyjne
- 3 liczymy transmitancję połączenia szeregowego
- 4 rozdzielamy węzeł sumacyjny ③'
- 5 liczymy transmitancję połączenia ze sprzężeniem zwrotnym
- 6 liczymy transmitancję połączenia równoległego
- 7 wyznaczamy transmitancję zastępczą układu poprzez wyznaczenie transmitancji połączenia szeregowego