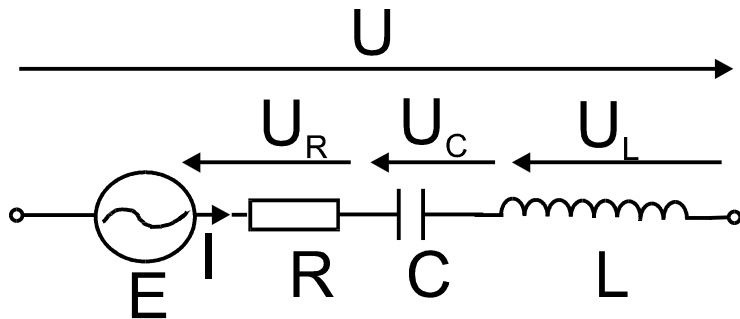


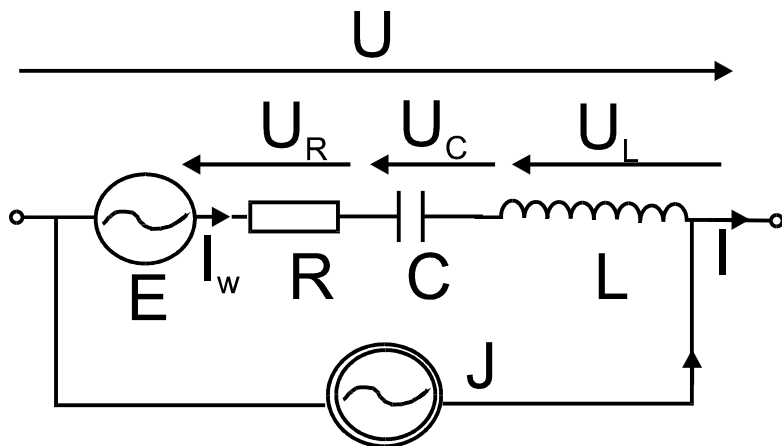
Gałąź normalna

- o zasilaniu napięciowym



$$U = E - ZI$$

- o zasilaniu mieszanym



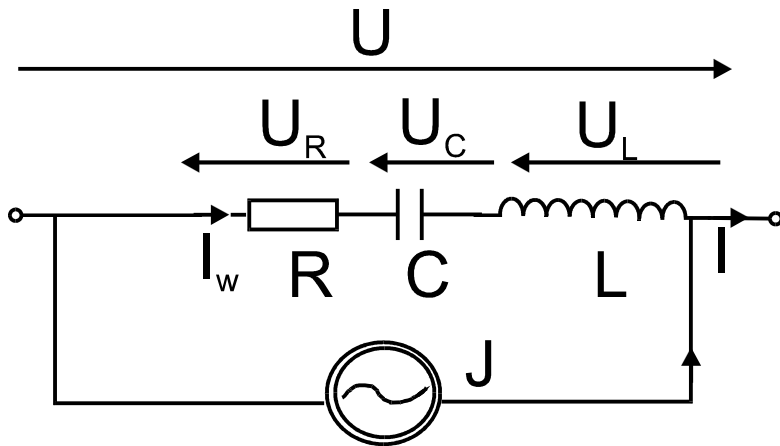
$$\left. \begin{aligned} U - E &= -ZI_w \\ I &= J + I_w \end{aligned} \right\}$$



$$U = E + ZJ - ZI$$

Gałąź normalna

- o zasilaniu prądowym

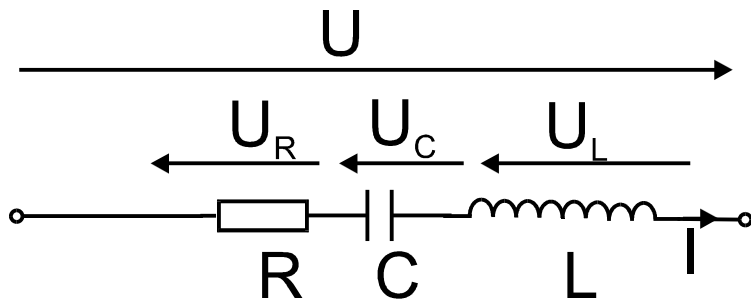


$$\left. \begin{aligned} U &= -ZI_w \\ I &= J + I_w \end{aligned} \right\}$$



$$U = ZJ - ZI$$

- bierna



$$U = -ZI$$

Sieci ze źródłami napięciowymi

$$\left. \begin{array}{l} U_1 = E_1 - Z_1 I_1 \\ U_2 = E_2 - Z_2 I_2 \\ \\ U_k = E_k - Z_k I_k \end{array} \right\} \quad \longrightarrow \quad [U] = [E] - [Z][I]$$

W przypadku sieci z obwodami sprzężzonymi

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= E_1 - (Z_{11}I_1 + j\omega M_{12}I_2 + j\omega M_{13}I_3 + \dots\dots\dots + j\omega M_{1k}I_k) \\ U_2 &= E_2 - (j\omega M_{21}I_1 + Z_{22}I_2 + j\omega M_{23}I_3 + \dots\dots\dots + j\omega M_{2k}I_k) \\ &\dots\dots\dots \\ U_k &= E_k - (j\omega M_{k1}I_1 + j\omega M_{k2}I_2 + j\omega M_{k3}I_3 + \dots\dots\dots + Z_{kk}I_k) \end{aligned} \right\}$$

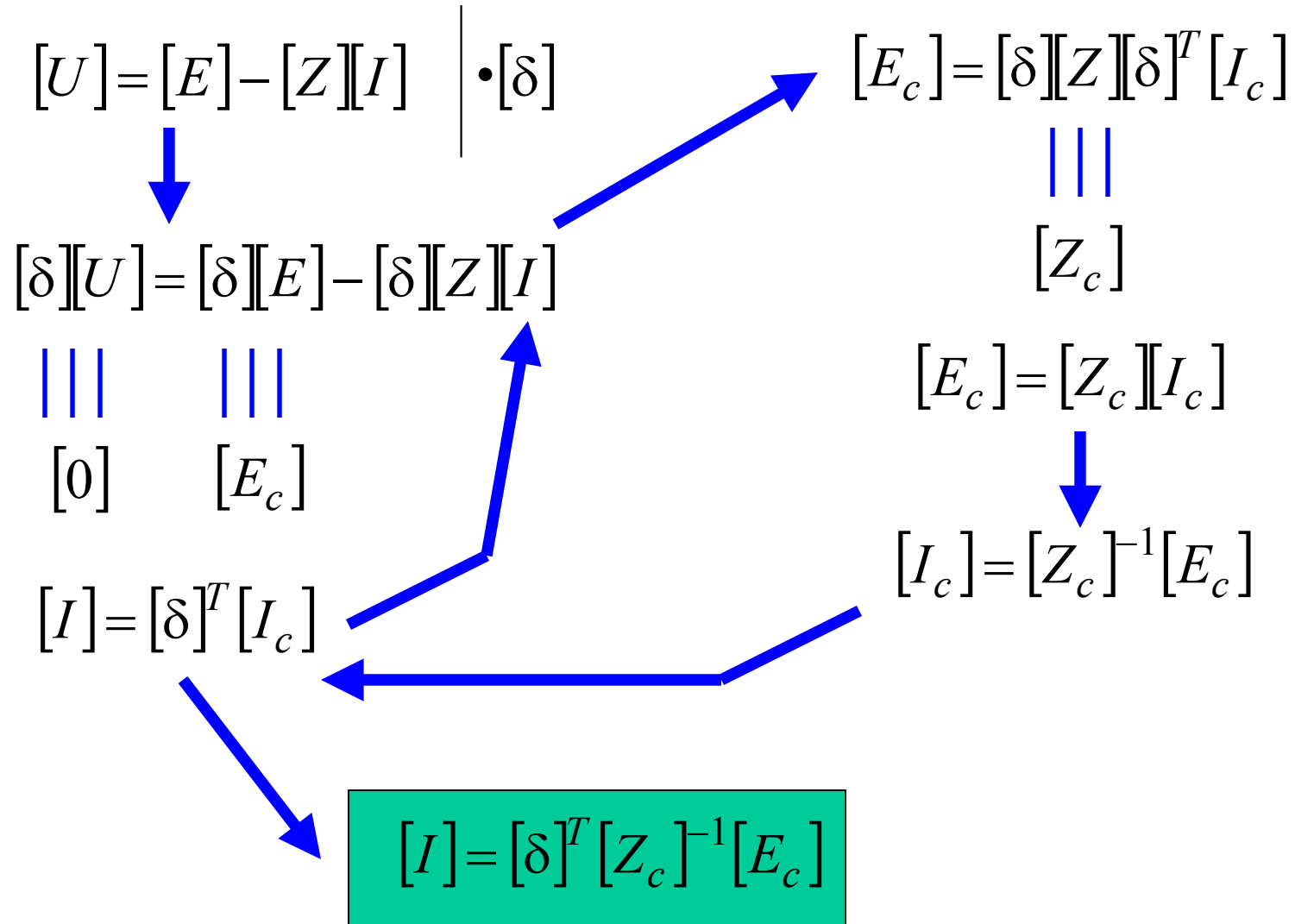
Macierz impedancji gałęziowych

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{11} & j\omega M_{12} & j\omega M_{13} & \dots\dots\dots & j\omega M_{1k} \\ j\omega M_{21} & Z_{22} & j\omega M_{23} & \dots\dots\dots & j\omega M_{2k} \\ \dots\dots\dots & \dots\dots\dots & \dots\dots\dots & \dots\dots\dots & \dots\dots\dots \\ j\omega M_{k1} & j\omega M_{k2} & j\omega M_{k3} & \dots\dots\dots & Z_{kk} \end{bmatrix}$$

gdzie

$$Z_{ii} = R_i + j\omega L_i + \frac{1}{j\omega C_i}$$

Metoda prądów obwodowych



Sieci ze źródłami prądowymi

$$\left. \begin{array}{l} U_1 = -Z_1 I_{w_1} \\ I_1 = J_1 + I_{w_1} \end{array} \right\}$$

$$\left. \begin{array}{l} U_2 = -Z_2 I_{w_2} \\ I_2 = J_2 + I_{w_2} \end{array} \right\}$$

.....

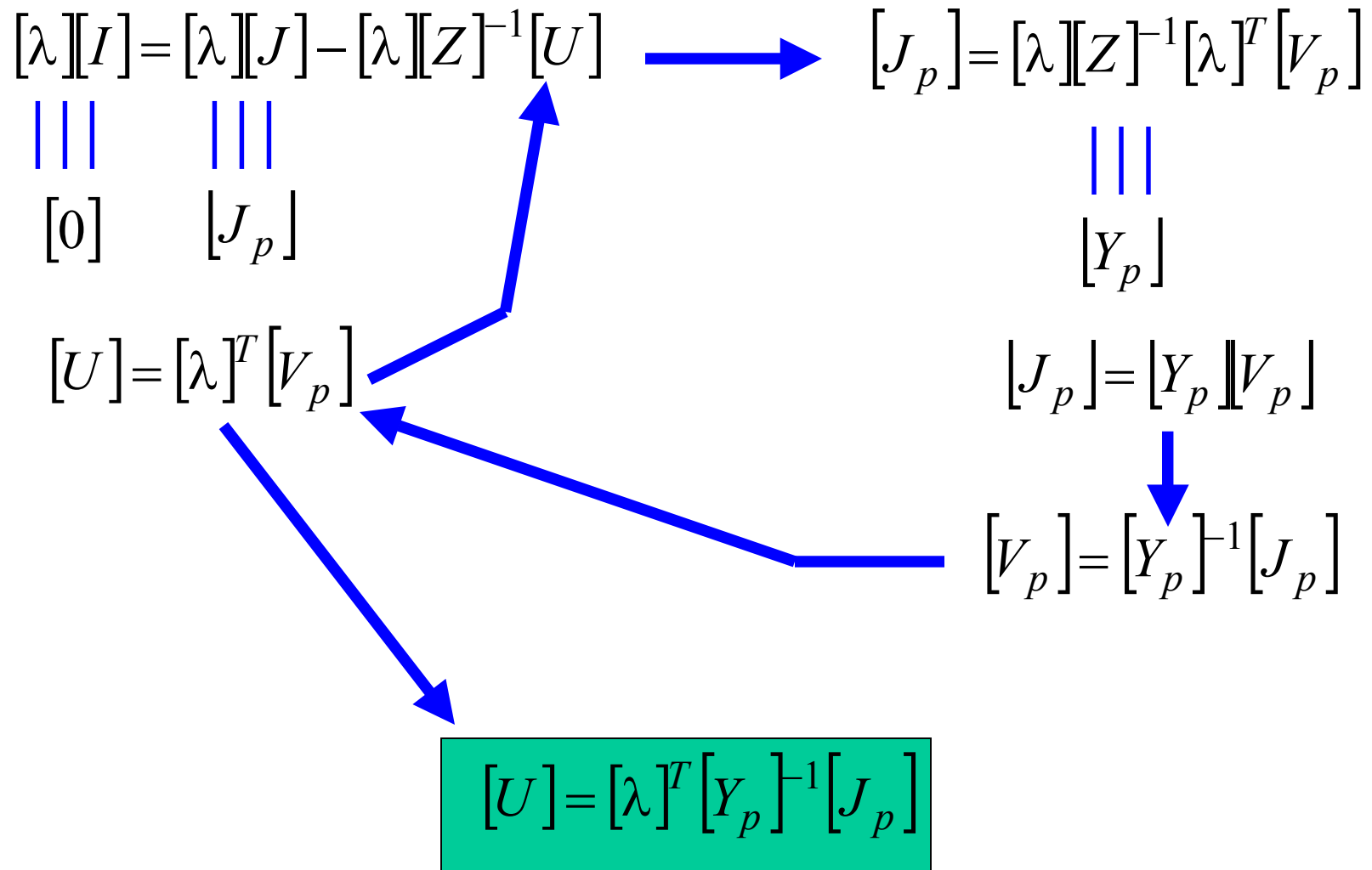
$$\left. \begin{array}{l} U_w = -Z_w I_{w_w} \\ I_w = J_w + I_{w_w} \end{array} \right\}$$

$$\left. \begin{array}{l} [U] = -[Z][I_w] \\ [I] = [J] + [I_w] \end{array} \right\}$$

$$[I_w] = -[Z]^{-1}[U]$$

$$[I] = [J] - [Z]^{-1}[U] \quad \Bigg| \cdot [\lambda]$$

Metoda potencjałów węzłowych



Równoważność sieci

Twierdzenie o równoważności sieci

Dwie sieci są równoważne, wtedy i tylko wtedy gdy ich charakterystyki są jednakowe

Charakterystyka sieci - zbiór par: wektor wymuszenia całkowitego, wektor odpowiedzi całkowitej ($[E]$, $[I]$ lub $[J]$, $[U]$)

$$\begin{aligned} [I] &= [\delta]^T [Z_c]^{-1} [\delta][E] \rightarrow [E_c] \\ [U] &= [\lambda]^T [Y_p]^{-1} [\lambda][J] \rightarrow [J_p] \end{aligned}$$

Równoważność sieci

W sieciach o wymuszeniach napięciowych odpowiedź całkowita (wektor prądów gałęziowych) zależy od wektora obwodowych sił elektromotorycznych.

Jeżeli zmienimy siły elektromotoryczne w gałęziach, nie zmieniając tego wektora to wektor odpowiedzi nie zmieni się.

$$[I] = [\delta]^T [Z_c]^{-1} [\delta][E] \rightarrow [E_c]$$

Równoważność sieci

W sieciach o wymuszeniach prądowych odpowiedź całkowita (wektor napięć gałęziowych) zależy od wektora węzłowych prądów źródłowych.

Jeżeli zmienimy prądy źródłowe w węzłach, nie zmieniając tego wektora to wektor odpowiedzi nie zmieni się.

$$[U] = [\lambda]^T [Y_p]^{-1} [\lambda][J] \rightarrow [J_p]$$

Równoważność sieci

Charakterystyka sieci nie jest funkcją odwracalną - każdemu wektorowi wymuszeń, odpowiada jeden i tylko jeden wektor odpowiedzi całkowitej.

Każdemu wektorowi odpowiedzi całkowitej odpowiada nieskończenie wiele wektorów wymuszeń.

Transmitancja

$$[I] = [\delta]^T [Z_c]^{-1} [E_c]$$

$$[I] = [\delta]^T [Z_c]^{-1} [\delta] [E]$$

$$[Z_c] = [\delta] [Z] [\delta]^T$$

$$[I] = [\delta]^T \{ [\delta] [Z] [\delta]^T \}^{-1} [\delta] [E]$$

- **Transmitancja napięciowo prądowa**

$$[K]^{np} = [\delta]^T \{ [\delta] [Z] [\delta]^T \}^{-1} [\delta]$$

Transmitancje
zależą od
pulsacji,
wszystkich
elementów
biernych oraz
struktury ich
połączeń

$$[I] = [K]^{np} [E]$$

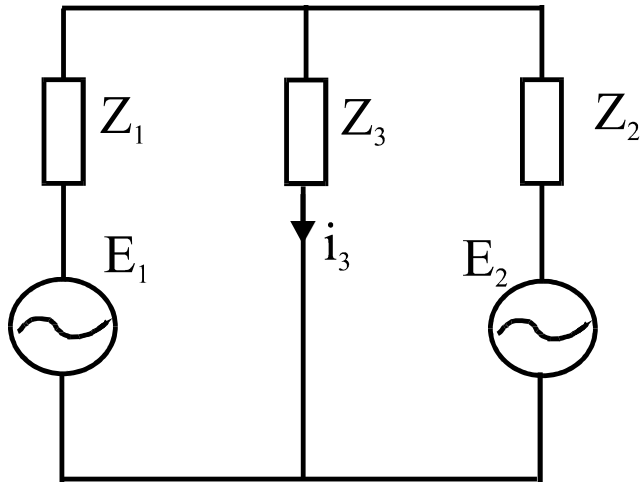
Transmitancja

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= K_{11}E_1 + K_{12}E_2 + K_{13}E_3 + \dots + K_{1k}E_k \\ I_2 &= K_{21}E_1 + K_{22}E_2 + K_{23}E_3 + \dots + K_{2k}E_k \\ &\dots \\ I_k &= K_{k1}E_1 + K_{k2}E_2 + K_{k3}E_3 + \dots + K_{kk}E_k \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= K_{11}E_1 + K_{12}E_2 + K_{13}E_3 + \dots + K_{1k}E_k \\ I_1 &= I_1' + I_1'' + I_1''' + \dots \end{aligned} \right\}$$

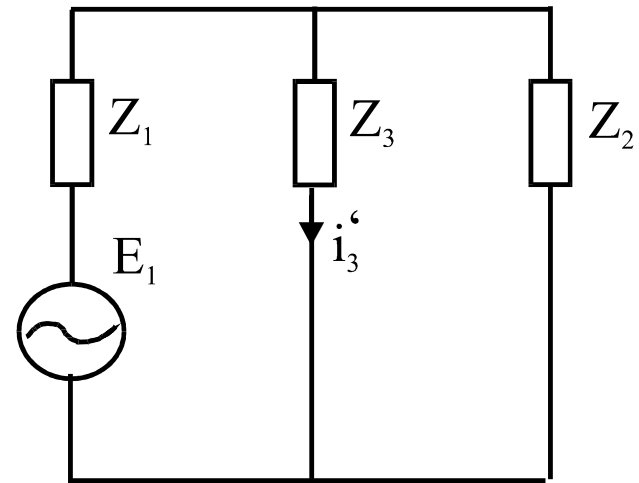
Transmitancja

$$i_3' = \frac{E_1}{Z_1} \frac{\frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}}{\frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} + Z_3}$$

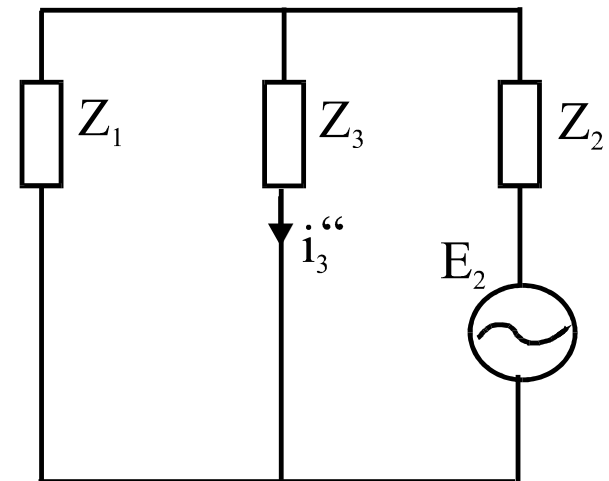


$$i_3'' = \frac{E_2}{Z_2} \frac{\frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}}{\frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} + Z_3}$$

≡



+



Transmitancja

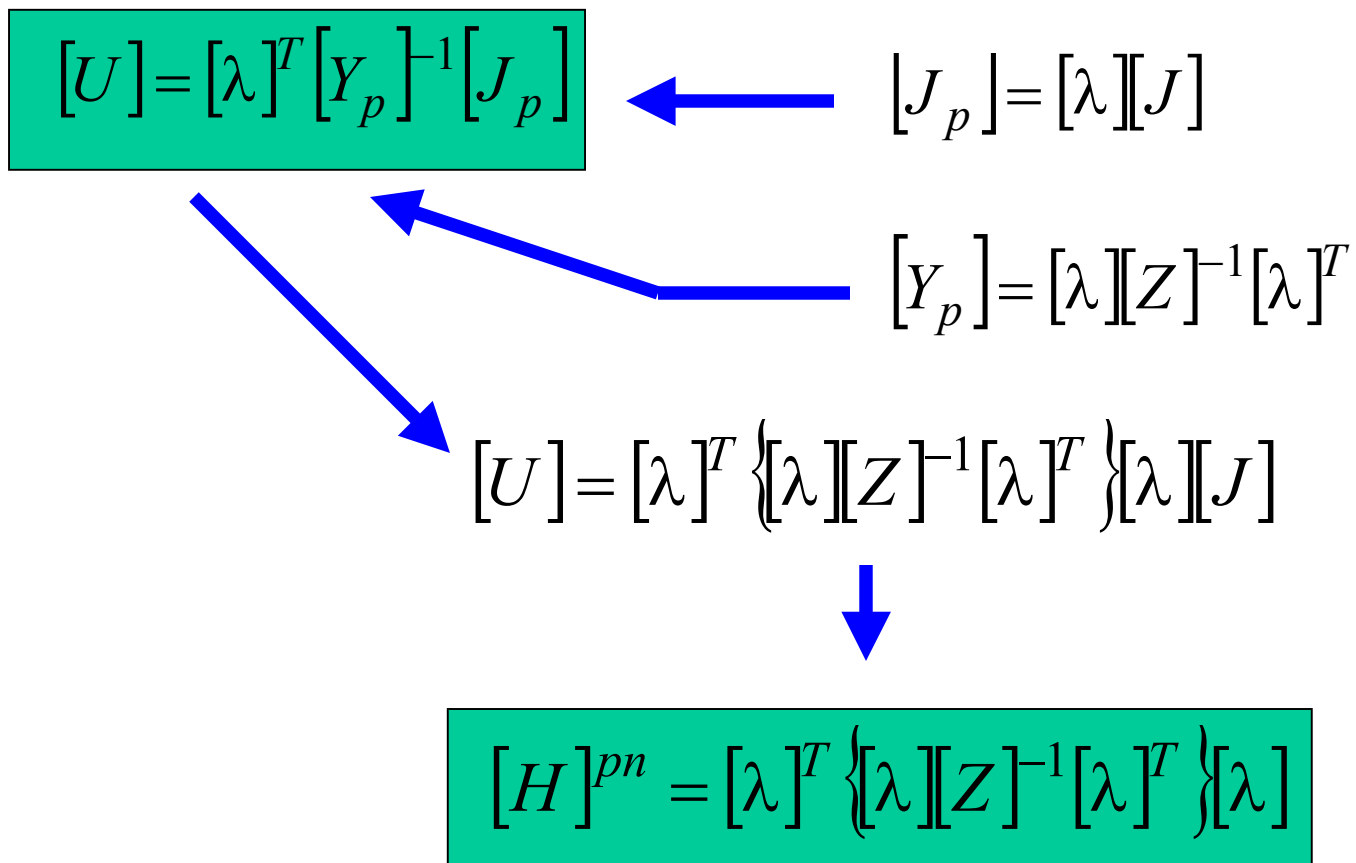
$$i_3 = i_3' + i_3'' = \frac{\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}}{\frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} + Z_3} E_1 + \frac{\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2}}{\frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} + Z_3} E_2$$

$$K_{31} = \frac{\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}}{\frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} + Z_3}$$

$$K_{32} = \frac{\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2}}{\frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} + Z_3}$$

Transmitancja

- **Transmitancja prądowo napięciowa**



Transmitancja

- **Transmitancja prądowo napięciowa**

$$[U] = [H]^{pn} [J]$$

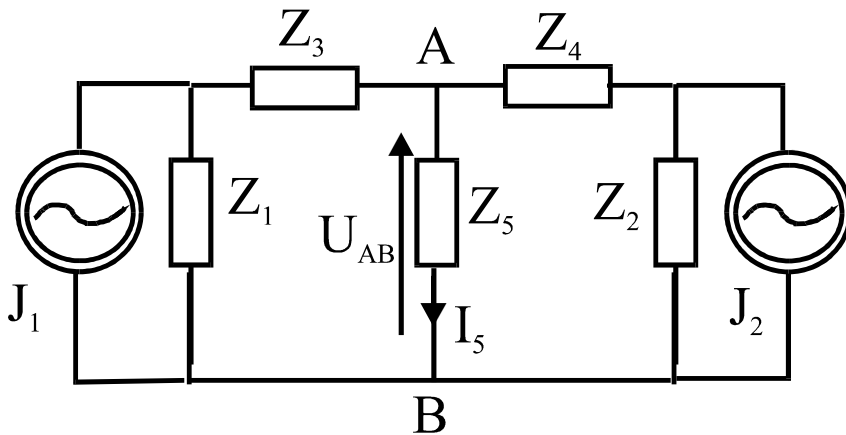
$$\left. \begin{aligned} U_1 &= H_{11}J_1 + H_{12}J_2 + H_{13}J_3 + \dots + H_{1k}J_k \\ U_2 &= H_{21}J_1 + H_{22}J_2 + H_{23}J_3 + \dots + H_{2k}J_k \\ &\dots \\ U_k &= H_{k1}J_1 + H_{k2}J_2 + H_{k3}J_3 + \dots + H_{kk}J_k \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= H_{11}J_1 + H_{12}J_2 + H_{13}J_3 + \dots + H_{1k}J_k \\ U_1 &= U_1' + U_1'' + U_1''' + \dots \end{aligned} \right\}$$

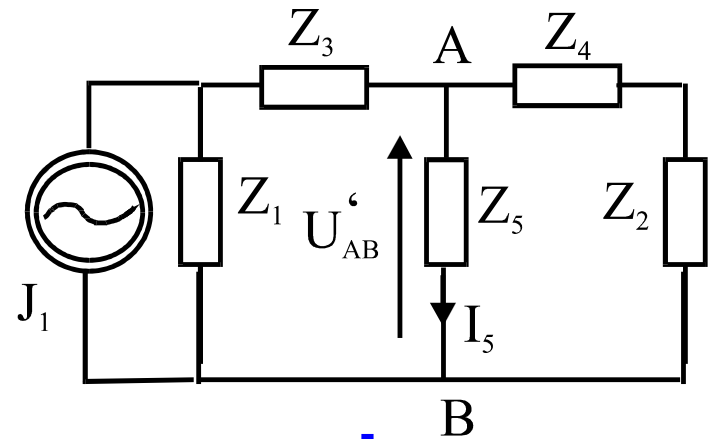
Transmitancja

- **Transmitancja prądowo napięciowa**

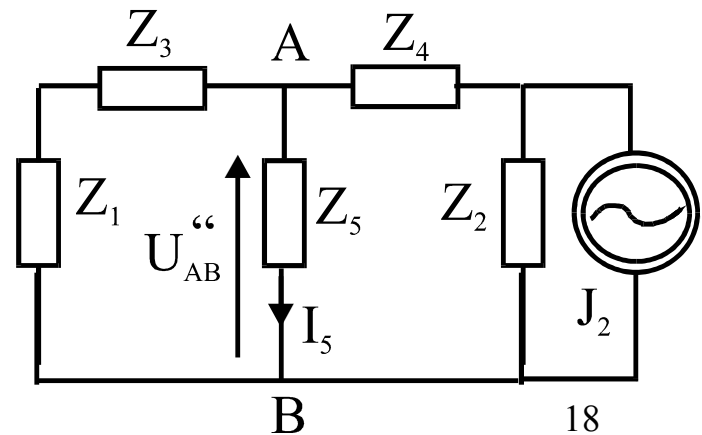
$$U'_{AB} = J_1 Z_1 \frac{\frac{Z_5(Z_2 + Z_4)}{Z_2 + Z_4 + Z_5}}{Z_1 + Z_3 + \frac{Z_5(Z_2 + Z_4)}{Z_2 + Z_4 + Z_5}}$$



≡



+



$$U''_{AB} = J_2 Z_2 \frac{\frac{Z_5(Z_1 + Z_3)}{Z_1 + Z_3 + Z_5}}{Z_2 + Z_4 + \frac{Z_5(Z_1 + Z_3)}{Z_1 + Z_3 + Z_5}}$$

Transmitancja

- **Transmitancja prądowo napięciowa**

$$U_{AB} = U'_{AB} + U''_{AB} = J_1 Z_1 \frac{\frac{Z_5(Z_2 + Z_4)}{Z_2 + Z_4 + Z_5}}{Z_1 + Z_3 + \frac{Z_5(Z_2 + Z_4)}{Z_2 + Z_4 + Z_5}} + J_2 Z_2 \frac{\frac{Z_5(Z_1 + Z_3)}{Z_1 + Z_3 + Z_5}}{Z_2 + Z_4 + \frac{Z_5(Z_1 + Z_3)}{Z_1 + Z_3 + Z_5}}$$

$$H_{51} = Z_1 \frac{\frac{Z_5(Z_2 + Z_4)}{Z_2 + Z_4 + Z_5}}{Z_1 + Z_3 + \frac{Z_5(Z_2 + Z_4)}{Z_2 + Z_4 + Z_5}}$$

$$H_{52} = Z_2 \frac{\frac{Z_5(Z_1 + Z_3)}{Z_1 + Z_3 + Z_5}}{Z_2 + Z_4 + \frac{Z_5(Z_1 + Z_3)}{Z_1 + Z_3 + Z_5}}$$

Transmitancja

- Transmitancja napięciowo napięciowa**

$$[U] = [E] - [Z][I] \quad \text{Dla sieci ze źródłami napięciowymi}$$

$$[I] = [K]^{np} [E]$$

$$[U] = [E] - [Z][K]^{np} [E]$$

$$[K]^{nn} = [Z][K]^{np}$$

$$[U] = [E] - [K]^{nn} [E]$$

Transmitancja

- Transmitancja prądowo prądowa**

$$\left. \begin{aligned} [U] &= -[Z][I_w] \\ [I] &= [J] + [I_w] \end{aligned} \right\}$$

Dla sieci ze źródłami prądowymi

$$[I] = [J] - [Z]^{-1}[U]$$

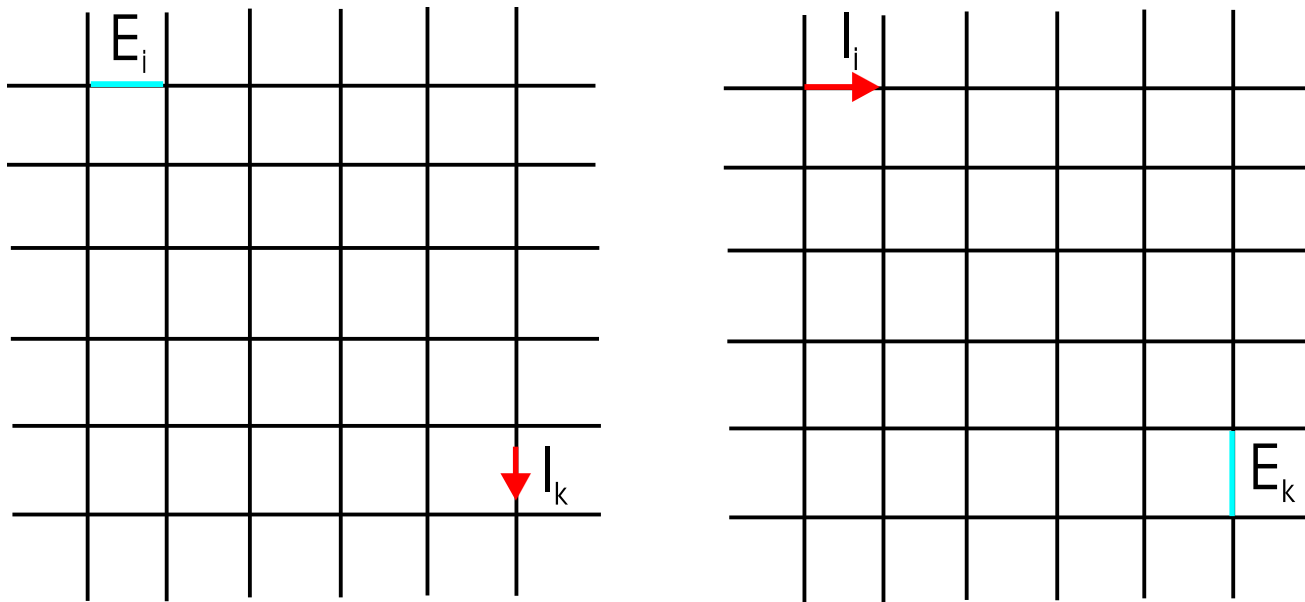
$$[U] = [H]^{pn}[J]$$

$$[I] = [J] - [Z]^{-1}[H]^{pn}[J]$$

$$[H]^{pp} = [Z]^{-1}[H]^{pn}$$

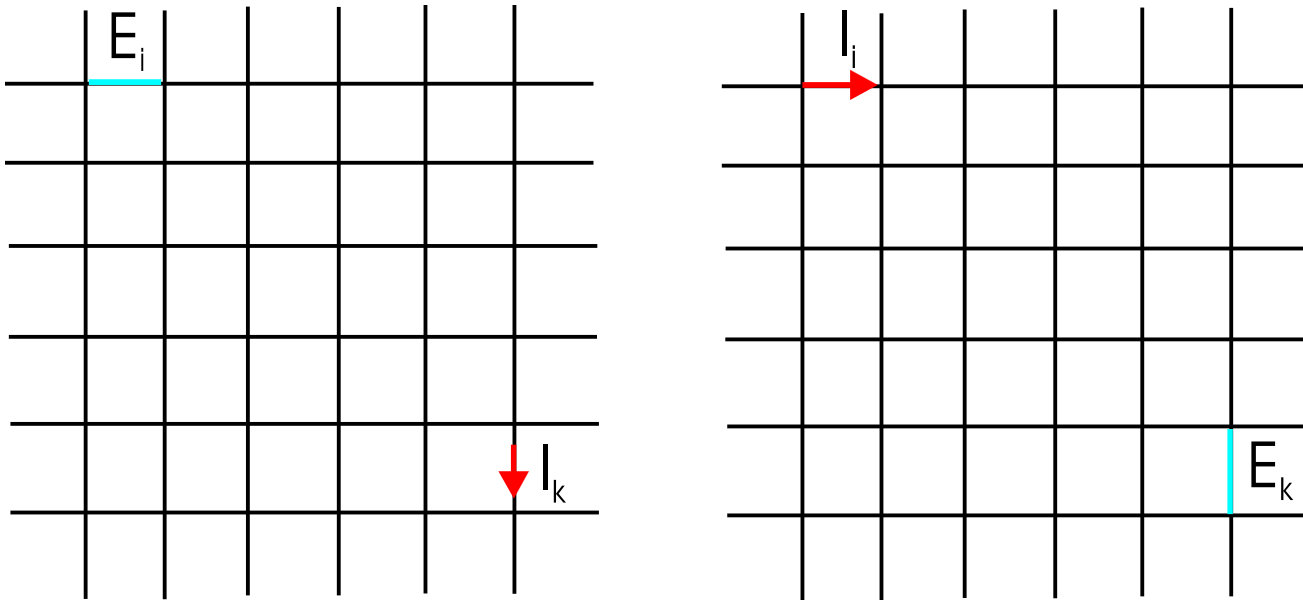
$$[I] = [J] - [H]^{pp}[J]$$

Zasada wzajemności



W każdej sieci o wymuszeniach napięciowych, jeżeli $E_i = E_k$ to $I_k = I_i$, ponieważ transmitancja napięciowo-prądowa $[K]^{np}$ jest macierzą symetryczną, gdyż stanowi kontrgradientną transformację macierzy symetrycznej $[Z]$ przy pomocy macierzy $[\delta]$.

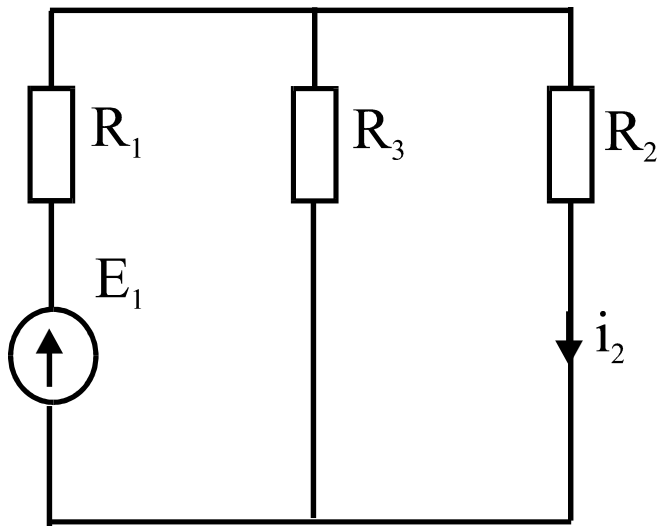
Zasada wzajemności



$$\begin{array}{ccc}
 I_k = K_{ki}^{np} E_i & \xrightarrow[\boxed{E_i = E_k}]{\boxed{I_k = I_i}} & \\
 I_i = K_{ik}^{np} E_k & & K_{ki}^{np} = K_{ik}^{np}
 \end{array}$$

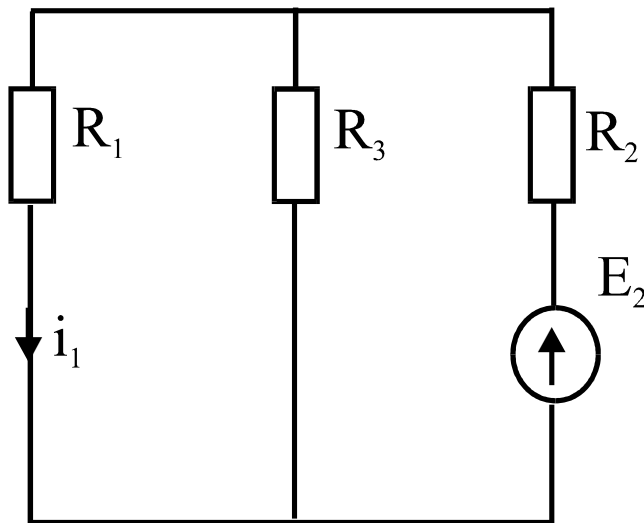
Zasada wzajemności - przykład

Niech: $R_1=2\Omega$, $R_2=10\Omega$, $R_3=5\Omega$,



$$i_2 = \frac{E_1}{R_1 \frac{\frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} + R_2}} = \frac{E_1}{16\Omega}$$

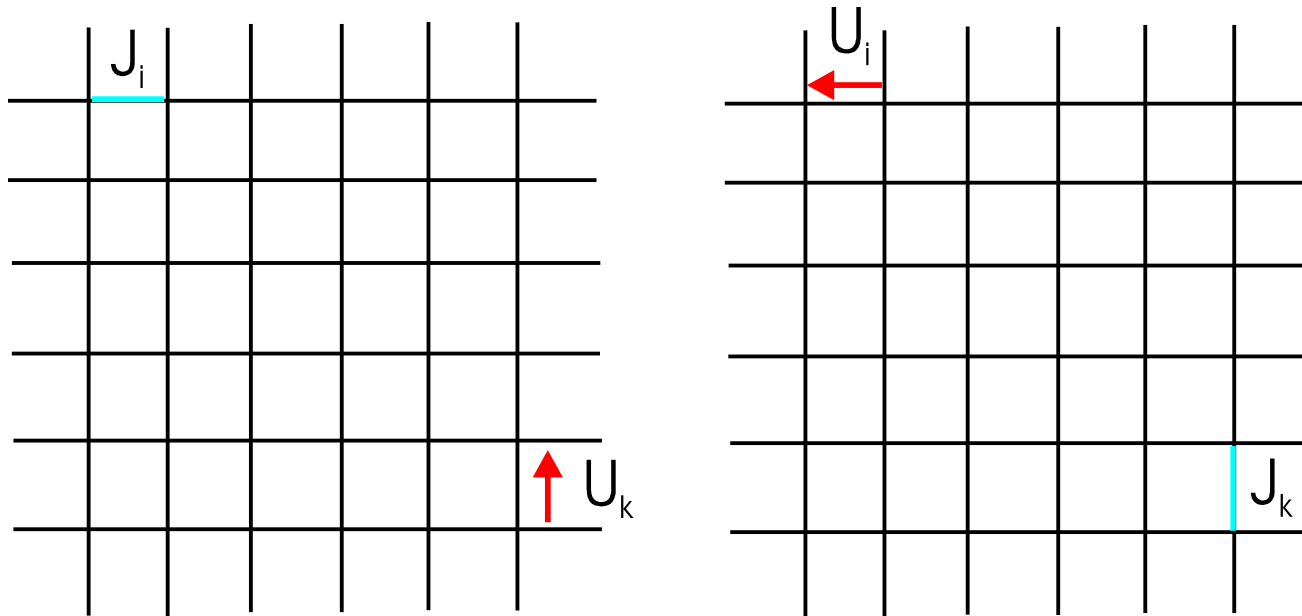
$10 / 7$
 $80 / 7$



$$i_1 = \frac{E_2}{R_2 \frac{\frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} + R_1}} = \frac{E_2}{16\Omega}$$

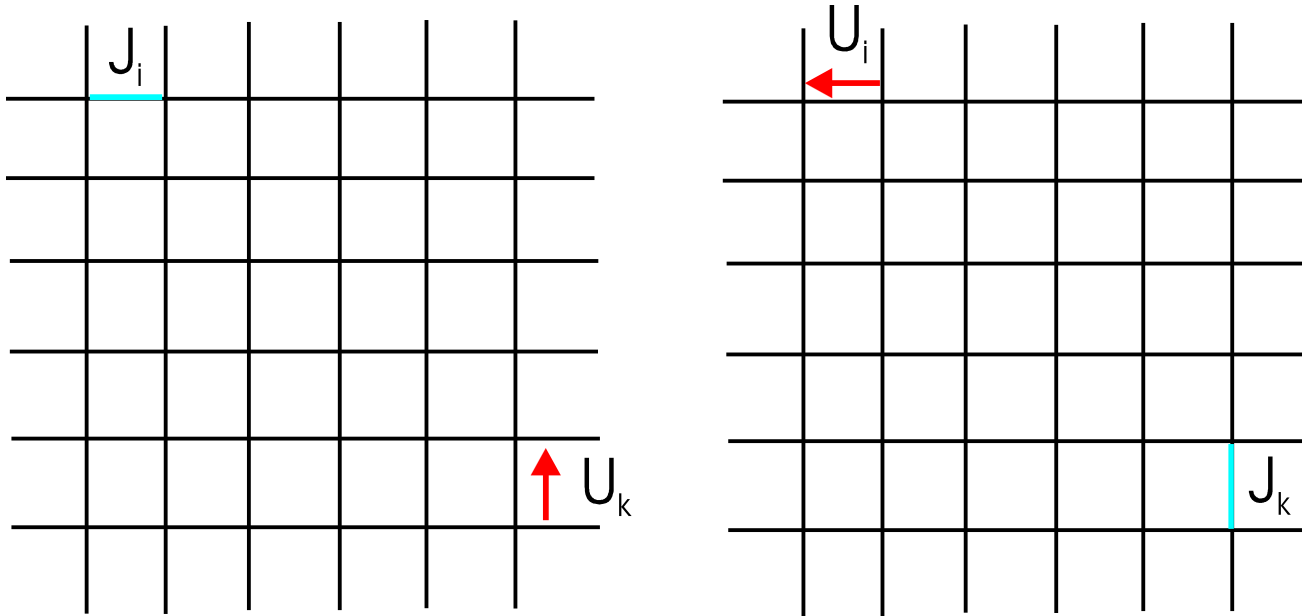
$50 / 15$
 $80 / 15$

Zasada wzajemności



W każdej sieci o wymuszeniach prądowych, jeżeli $J_i = J_k$ to $U_k = U_i$, ponieważ transmitancja prądowo-napięciowa $[H]^{pn}$ jest macierzą symetryczną, gdyż stanowi kontrgradientną transformację macierzy symetrycznej $[Z]^{-1}$ przy pomocy macierzy $[\lambda]$.

Zasada wzajemności



$$\begin{array}{ccc}
 U_k = H_{ki}^{pn} J_i & \begin{array}{c} \boxed{J_i = J_k} \\ \text{---} \end{array} & \begin{array}{c} \boxed{U_k = U_i} \\ \text{---} \end{array} \\
 U_i = H_{ik}^{pn} J_k & H_{ki}^{pn} = H_{ik}^{pn} &
 \end{array}$$

Zasada wzajemności

W sieci o wymuszeniach napięciowych, jeżeli $E_i = E_k$ to $U_k \neq U_i$, ponieważ transmitancja napięciowo-napięciowa $[K]^{nn}$ jest w ogólności macierzą niesymetryczną, gdyż stanowi iloczyn macierzy symetrycznych $[Z]$ i $[K]^{np}$.

$$[U] = [E] - [Z][K]^{np}[E]$$

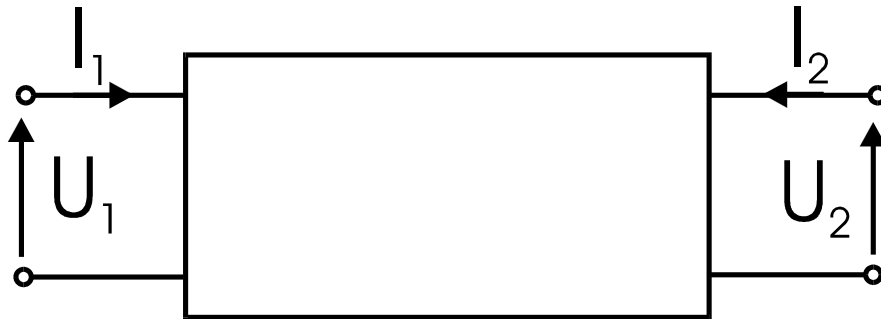
$$K_{ki}^{nn} \neq K_{ik}^{nn}$$

W sieci o wymuszeniach prądowych, jeżeli $J_i = J_k$ to $I_k \neq I_i$, ponieważ transmitancja prądowo-prądowa $[H]^{pp}$ jest w ogólności macierzą niesymetryczną, gdyż stanowi iloczyn macierzy symetrycznych $[Z]^{-1}$ i $[H]^{pn}$.

$$[I] = [J] - [Z]^{-1}[H]^{pn}[J]$$

$$H_{ki}^{pp} \neq H_{ik}^{pp}$$

Czwórniki liniowe



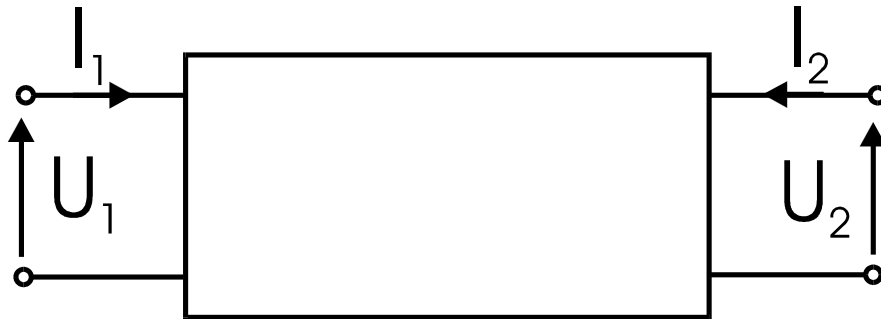
- opis impedancyjny - szeregowy

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= z_{11}I_1 + z_{12}I_2 \\ U_2 &= z_{21}I_1 + z_{22}I_2 \end{aligned} \right\} \longrightarrow \boxed{\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = [Z] \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}}$$

- opis admitancyjny - równoległy

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= y_{11}U_1 + y_{12}U_2 \\ I_2 &= y_{21}U_1 + y_{22}U_2 \end{aligned} \right\} \longrightarrow \boxed{\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = [Y] \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}}$$

Czwórniki liniowe



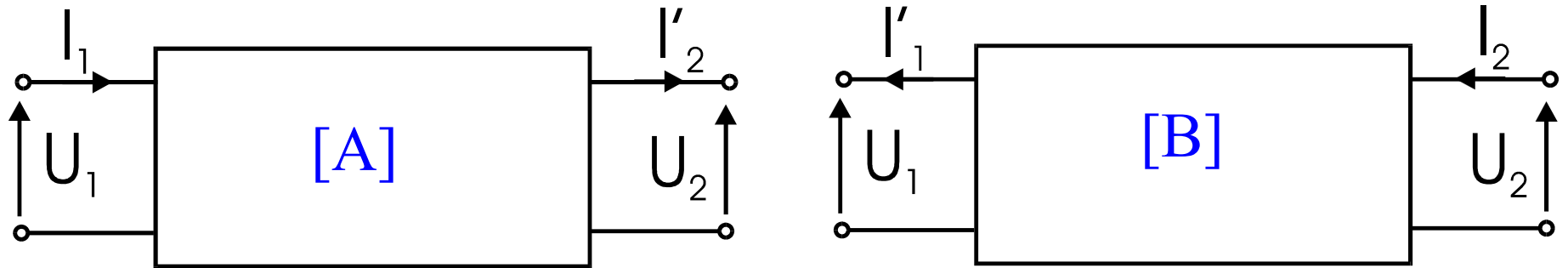
- opis równoległo szeregowy

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= g_{11}U_1 + g_{12}I_2 \\ U_2 &= g_{21}U_1 + g_{22}I_2 \end{aligned} \right\} \longrightarrow \boxed{\begin{bmatrix} I_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = [G] \begin{bmatrix} U_1 \\ I_2 \end{bmatrix}}$$

- opis szeregowo - równoległy

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= h_{11}I_1 + h_{12}U_2 \\ I_2 &= h_{21}I_1 + h_{22}U_2 \end{aligned} \right\} \longrightarrow \boxed{\begin{bmatrix} U_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = [H] \begin{bmatrix} I_1 \\ U_2 \end{bmatrix}}$$

Czwórniki liniowe



- opis łańcuchowy

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= a_{11}U_2 + a_{12}I'_2 \\ I_1 &= a_{21}U_2 + a_{22}I'_2 \end{aligned} \right\}$$



$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} U_2 \\ I'_2 \end{bmatrix}$$

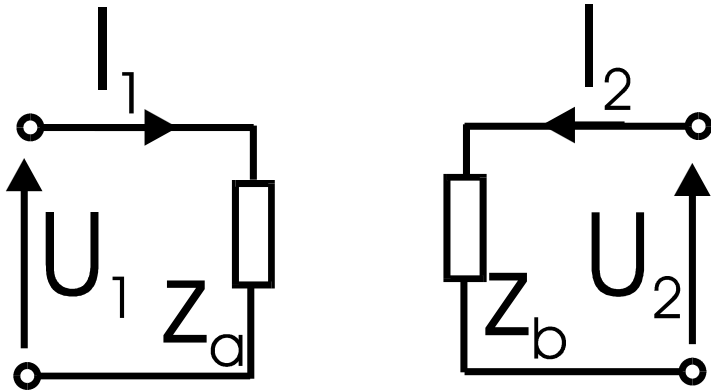
- opis łańcuchowy odwrotny

$$\left. \begin{aligned} U_2 &= b_{11}U_1 + b_{12}I'_1 \\ I_2 &= b_{21}U_1 + b_{22}I'_1 \end{aligned} \right\}$$



$$\begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = [B] \begin{bmatrix} U_1 \\ I'_1 \end{bmatrix}$$

Czwórnik osobliwy poprzecznie izolowany



$$z_{11} = \frac{U_1}{I_1} \Big|_{I_2 = 0} = \frac{I_1 z_a}{I_1} = z_a$$

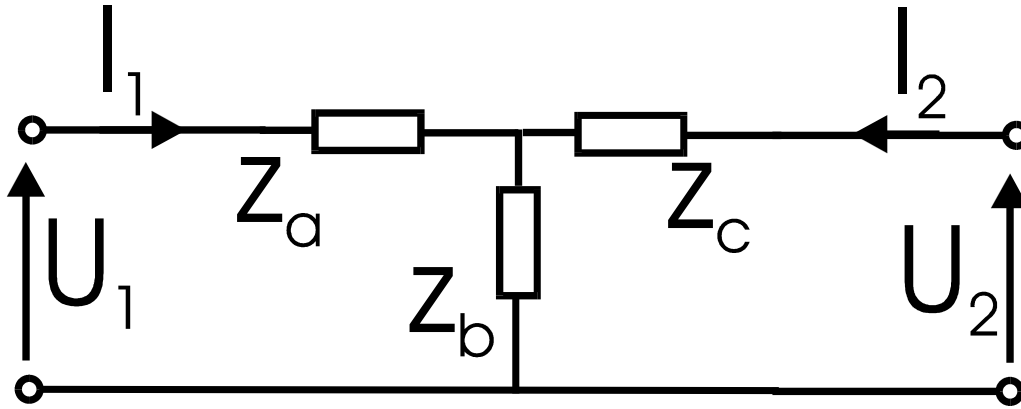
$$z_{12} = \frac{U_1}{I_2} \Big|_{I_1 = 0} = 0$$

$$z_{21} = \frac{U_2}{I_1} \Big|_{I_2 = 0} = 0$$

$$z_{22} = \frac{U_2}{I_2} \Big|_{I_1 = 0} = \frac{I_2 z_b}{I_2} = z_b$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} z_a & 0 \\ 0 & z_b \end{bmatrix}$$

Czwórnik nieosobliwy typu T



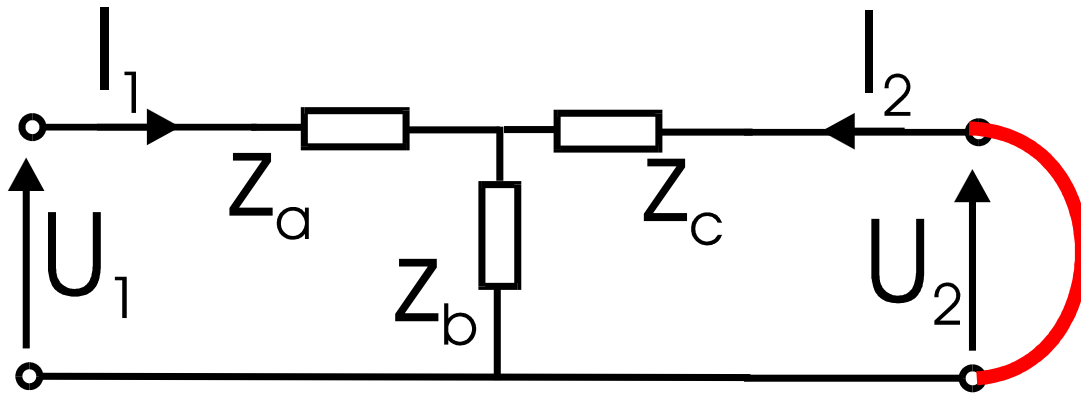
$$z_{11} = \frac{U_1}{I_1} \Big|_{I_2=0} = \frac{I_1(z_a + z_b)}{I_1} = z_a + z_b$$

$$z_{21} = \frac{U_2}{I_1} \Big|_{I_2=0} = \frac{I_1 z_b}{I_1} = z_b$$

$$z_{12} = \frac{U_1}{I_2} \Big|_{I_1=0} = \frac{I_2 z_b}{I_2} = z_b$$

$$z_{22} = \frac{U_2}{I_2} \Big|_{I_1=0} = \frac{I_2(z_b + z_c)}{I_2} = z_b + z_c$$

Czwórnik nieosobliwy typu T

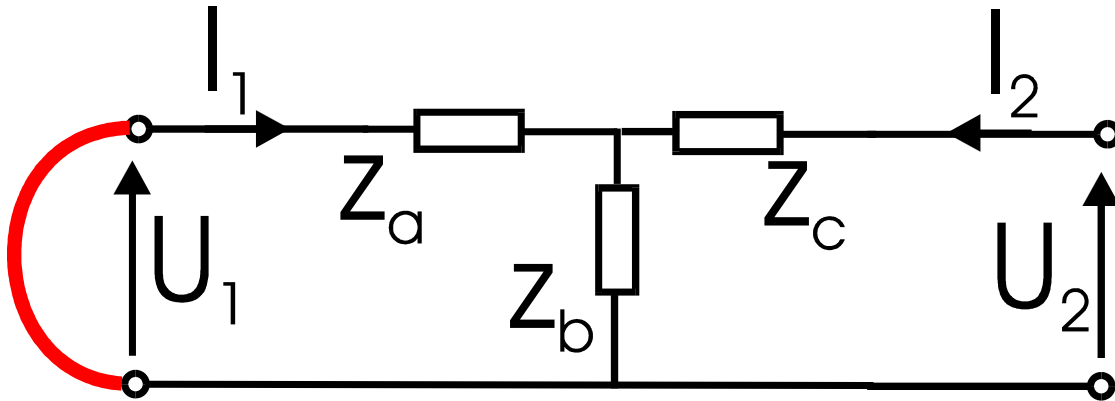


$$y_{11} = \frac{I_1}{U_1} \Big|_{U_2=0} = \frac{I_1}{I_1 \left(z_a + \frac{z_b z_c}{z_b + z_c} \right)} = \frac{z_b + z_c}{z_a z_b + z_a z_c + z_b z_c} = \frac{z_b + z_c}{\det Z}$$

$$y_{21} = \frac{I_2}{U_1} \Big|_{U_2=0} \quad I_2 = -\frac{z_b}{z_b + z_c} I_1 \quad I_1 = \frac{U_1}{z_a + \frac{z_b z_c}{z_b + z_c}}$$

$$y_{21} = -\frac{z_b}{z_a z_b + z_a z_c + z_b z_c} = -\frac{z_b}{\det Z}$$

Czwórnik nieosobliwy typu T



$$y_{22} = \frac{I_2}{U_2} \Big|_{U_1=0} = \frac{I_2}{I_2 \left(z_c + \frac{z_b z_a}{z_b + z_a} \right)} = \frac{z_b + z_a}{z_a z_b + z_a z_c + z_b z_c} = \frac{z_b + z_a}{\det Z}$$

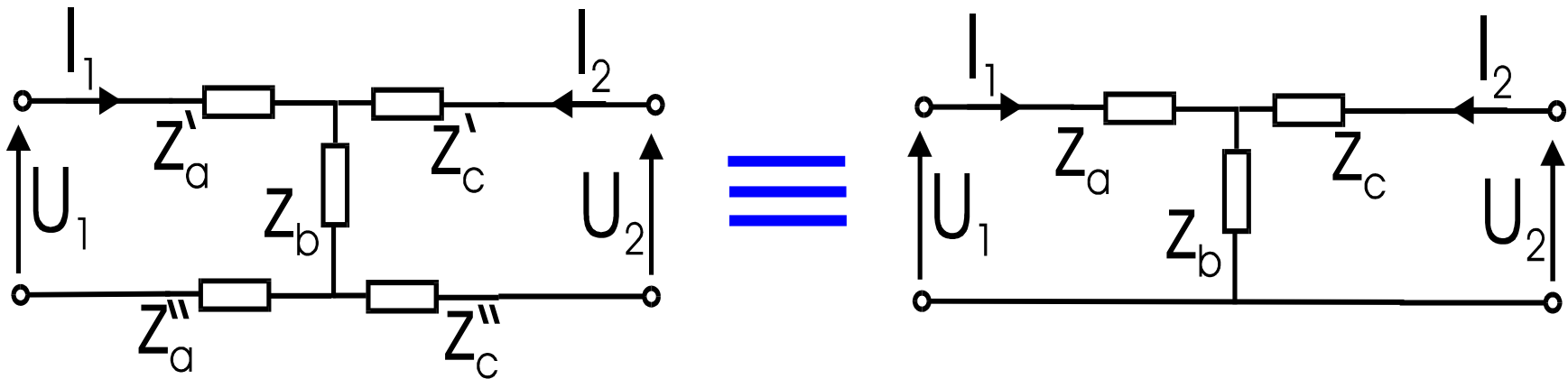
$$y_{12} = \frac{I_1}{U_2} \Big|_{U_1=0}$$

$$I_1 = -\frac{z_b}{z_b + z_a} I_2$$

$$I_2 = \frac{U_2}{z_c + \frac{z_b z_a}{z_b + z_a}}$$

$$y_{12} = -\frac{z_b}{z_a z_b + z_a z_c + z_b z_c} = -\frac{z_b}{\det Z}$$

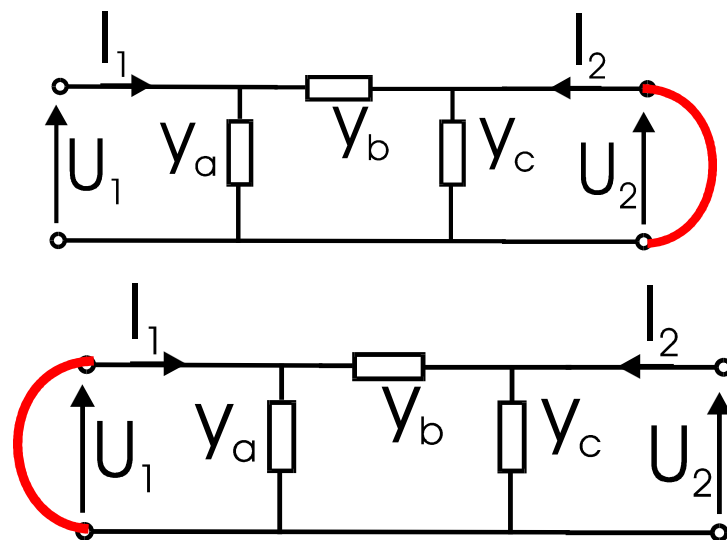
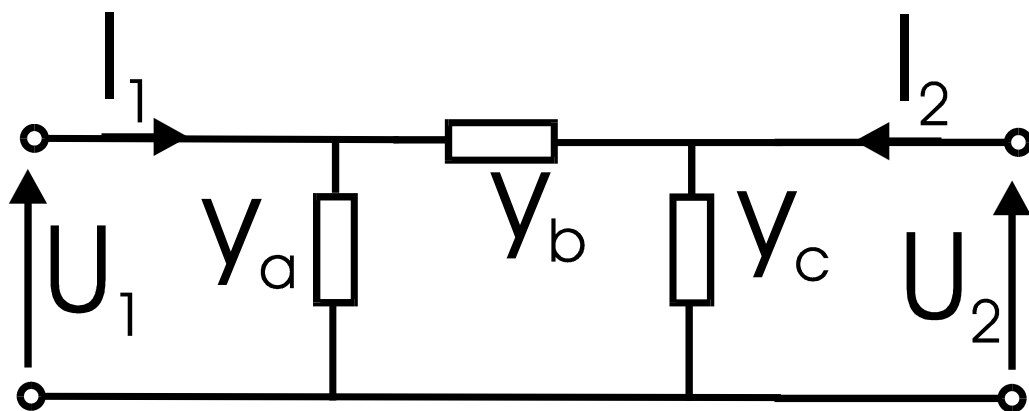
Czwórnik nieosobliwy typu H



$$Z'_a + Z''_a = Z_a$$

$$Z'_c + Z''_c = Z_c$$

Czwórnik nieosobliwy typu Π



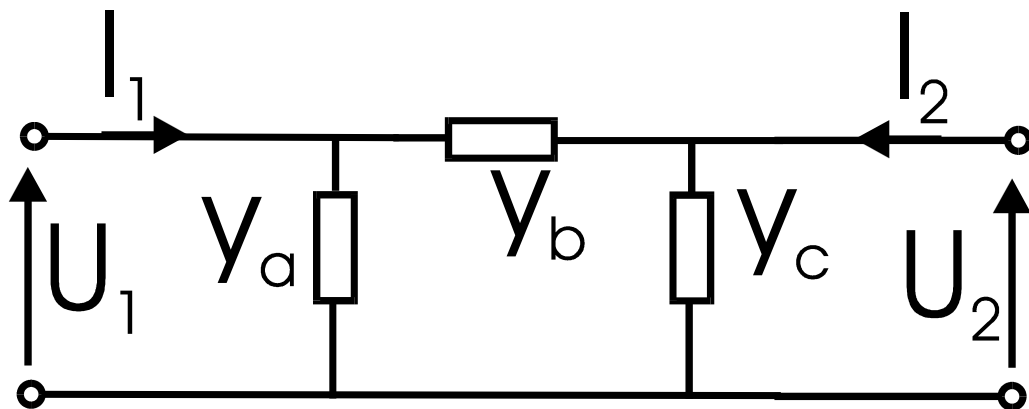
$$y_{11} = \frac{I_1}{U_1} \Big|_{U_2 = 0} = \frac{I_1}{I_1} = y_a + y_b$$

$$y_{21} = \frac{I_2}{U_1} \Big|_{U_2 = 0} = \frac{I_2}{-I_2} = -y_b$$

$$y_{12} = \frac{I_1}{U_2} \Big|_{U_1 = 0} = \frac{I_1}{-I_1} = -y_b$$

$$y_{22} = \frac{I_2}{U_2} \Big|_{U_1 = 0} = \frac{I_2}{I_2} = y_b + y_c$$

Czwórnik nieosobliwy typu Π



$$z_{11} = \frac{U_1}{I_1} \Big|_{I_2=0} = \frac{I_1}{I_1 \left(y_a + \frac{y_b y_c}{y_b + y_c} \right)} = \frac{y_b + y_c}{y_a y_b + y_a y_c + y_b y_c} = \frac{y_b + y_c}{\det Y}$$

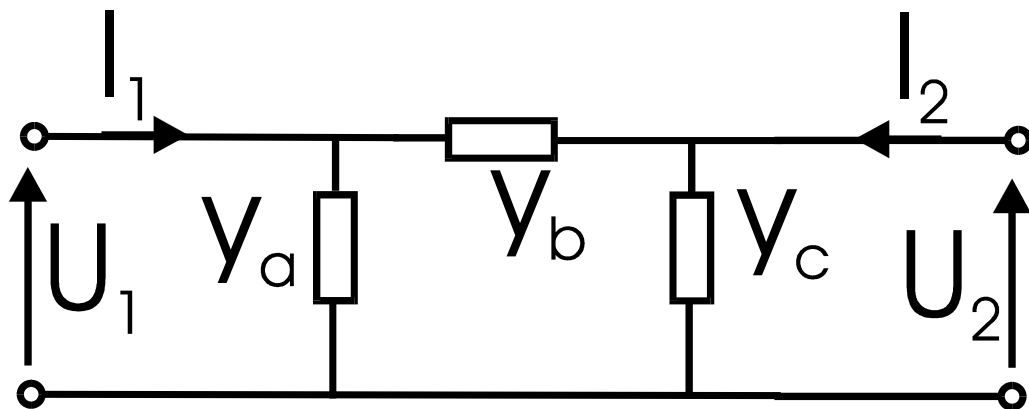
$$z_{12} = \frac{U_1}{I_2} \Big|_{I_1=0}$$

$$U_1 = \frac{y_b}{y_b + y_a} U_2$$

$$U_2 = \frac{I_2}{y_c + \frac{y_b y_a}{y_b + y_a}}$$

$$z_{12} = \frac{I_2 \frac{y_a y_b}{y_a + y_b}}{\left(\frac{y_a y_b}{y_a + y_b} + y_c \right) I_2 y_a} = \frac{y_b}{\det Y}$$

Czwórnik nieosobliwy typu Π



$$z_{22} = \frac{U_2}{I_2} \Big|_{I_1=0} = \frac{I_2}{I_2 \left(y_c + \frac{y_b y_a}{y_b + y_a} \right)} = \frac{y_b + y_a}{y_a y_b + y_a y_c + y_b y_c} = \frac{y_b + y_a}{\det Y}$$

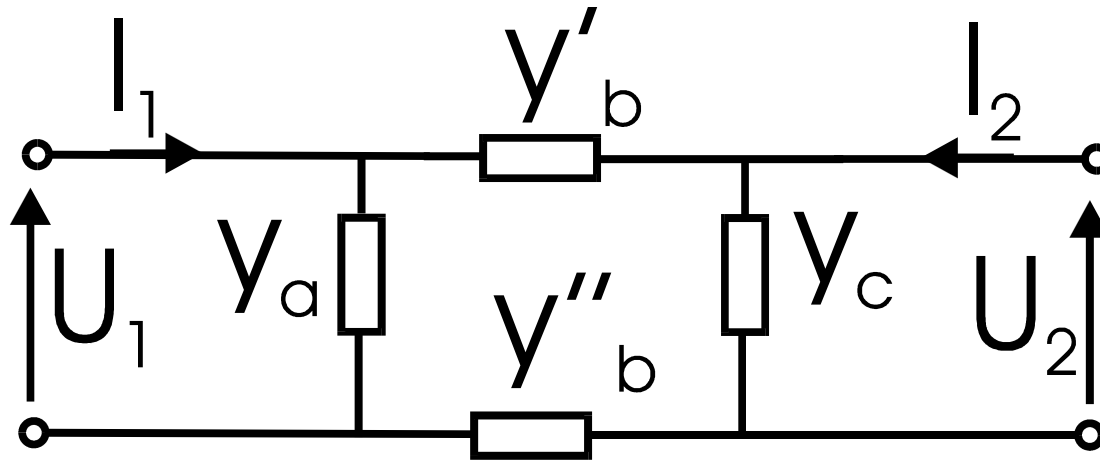
$$z_{21} = \frac{U_2}{I_1} \Big|_{I_2=0}$$

$$U_2 = \frac{y_b}{y_b + y_c} U_1$$

$$U_1 = \frac{I_1}{y_a + \frac{y_b y_c}{y_b + y_c}}$$

$$z_{21} = \frac{I_1 \frac{y_b y_c}{y_b + y_c}}{I_1 y_c \left(\frac{y_b y_c}{y_b + y_c} + y_a \right)} = \frac{y_b}{\det Y}$$

Czwórnik typu O



Czwórnik typu O jest równoważny czwórnikowi typu Π , jeżeli :

$$y_b = y'_b + y''_b$$

Symetria czwórników

- Symetria energetyczna (odwracalność)

$$z_{12} = z_{21}, y_{12} = y_{21}, g_{12} = -g_{21}, h_{12} = -h_{21}, \\ \det A = 1, \det B = 1$$

- Symetria impedancyjna

$$z_{11} = z_{22}, y_{11} = y_{22}, a_{11} = a_{22}, b_{11} = b_{22}, \\ \det G = 1, \det H = 1$$

Parametry falowe czwórników

- Impedancja falowa

$$z_f = \sqrt{\det Z} = \sqrt{a_{12}/a_{21}}$$

- Przekładnia impedancyjna

$$p_i = \sqrt{z_{22}/z_{11}} = \sqrt{a_{22}/a_{11}} = \sqrt{\det G}$$

- Przekładnia energetyczna

$$p_e = \sqrt{z_{12}/z_{21}} = \sqrt{\det A}$$

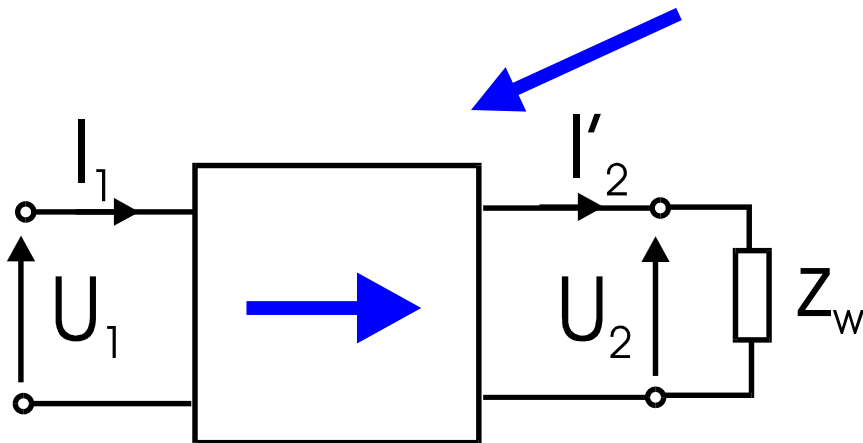
- Współczynnik przenoszenia falowego

$$\cosh g = \sqrt{\frac{z_{11}z_{22}}{z_{12}z_{21}}} = \sqrt{\frac{a_{11}a_{22}}{\det A}}$$

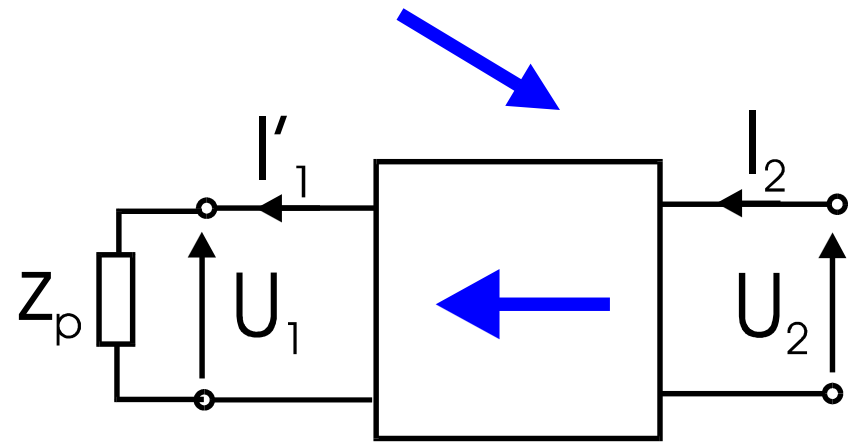
Parametry falowe czwórników

Wszystkie macierze czwórników można wyrazić za pomocą parametrów falowych.

- Dopasowanie: a) od strony wtórnej, b) od strony pierwotnej

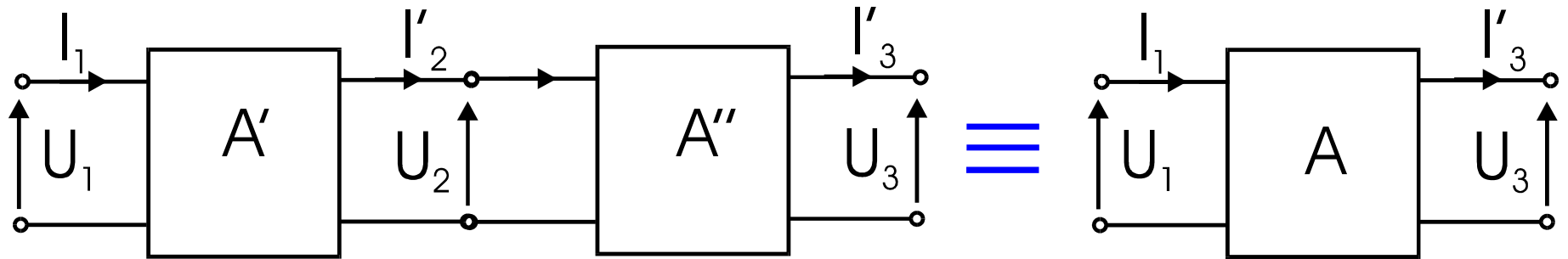


$$Z_w = p_i Z_f$$



$$Z_p = \frac{Z_f}{p_i}$$

Łączenie łańcuchowe czwórników

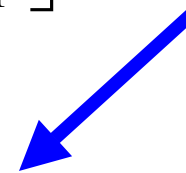


$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = [A'] \begin{bmatrix} U_2 \\ I'_2 \end{bmatrix}$$



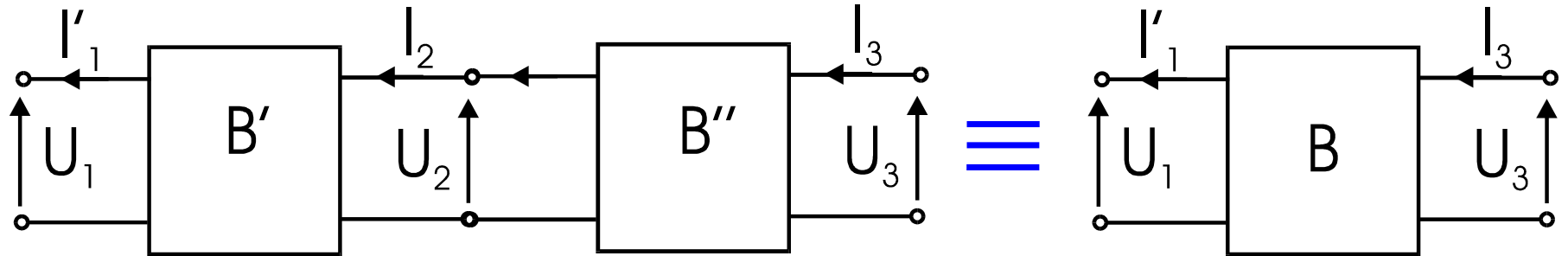
$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = [A'] [A''] \begin{bmatrix} U_3 \\ I'_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} U_2 \\ I'_2 \end{bmatrix} = [A''] \begin{bmatrix} U_3 \\ I'_3 \end{bmatrix}$$



$$[A] = [A'] [A'']$$

Łączenie łańcuchowe odwrotne czwórników



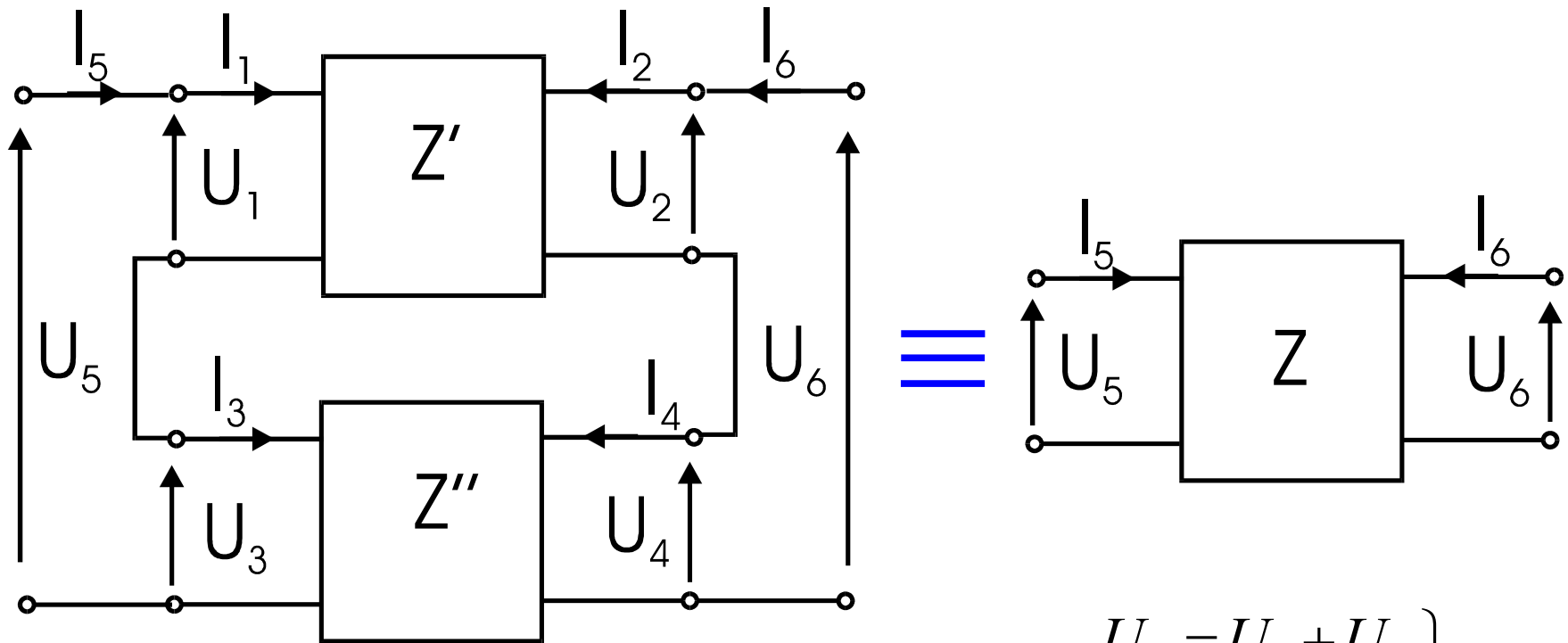
$$\begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = [B'] \begin{bmatrix} U_1 \\ I'_1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} U_3 \\ I_3 \end{bmatrix} = [B''] [B'] \begin{bmatrix} U_1 \\ I'_1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} U_3 \\ I_3 \end{bmatrix} = [B''] \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

$$[B] = [B''] [B']$$

Łączenie szeregowe czwórników

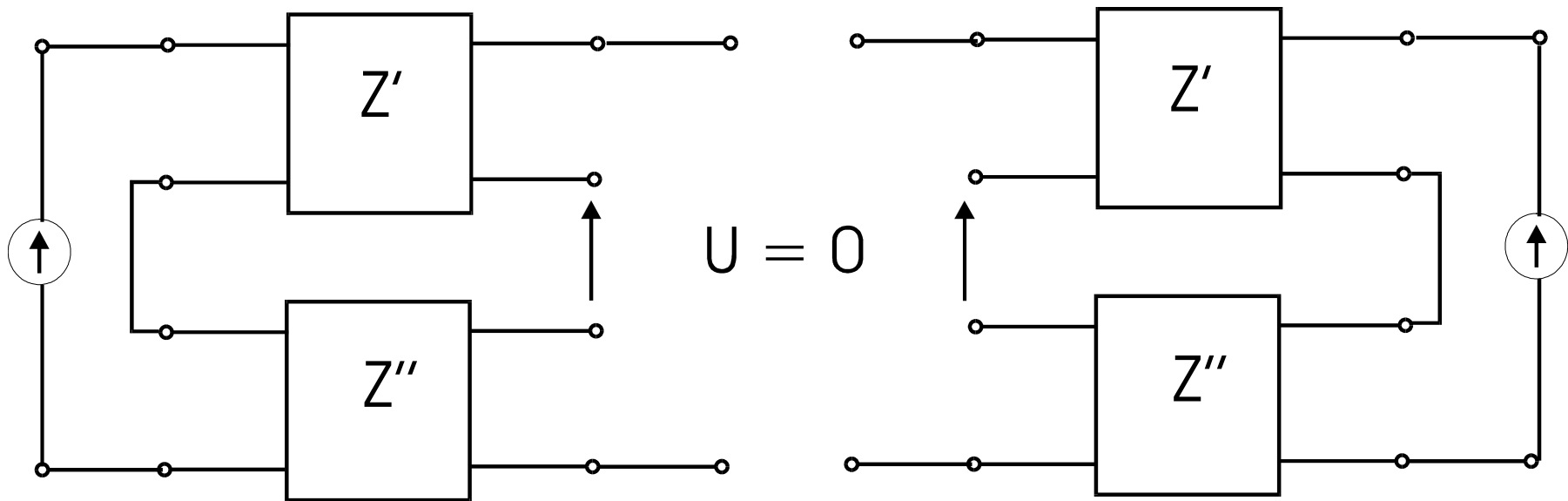


$$\left. \begin{aligned} U_5 &= U_1 + U_3 \\ U_6 &= U_2 + U_4 \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = [Z'] \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = [Z''] \begin{bmatrix} I_3 \\ I_4 \end{bmatrix}$$

Łączenie szeregowe czwórników

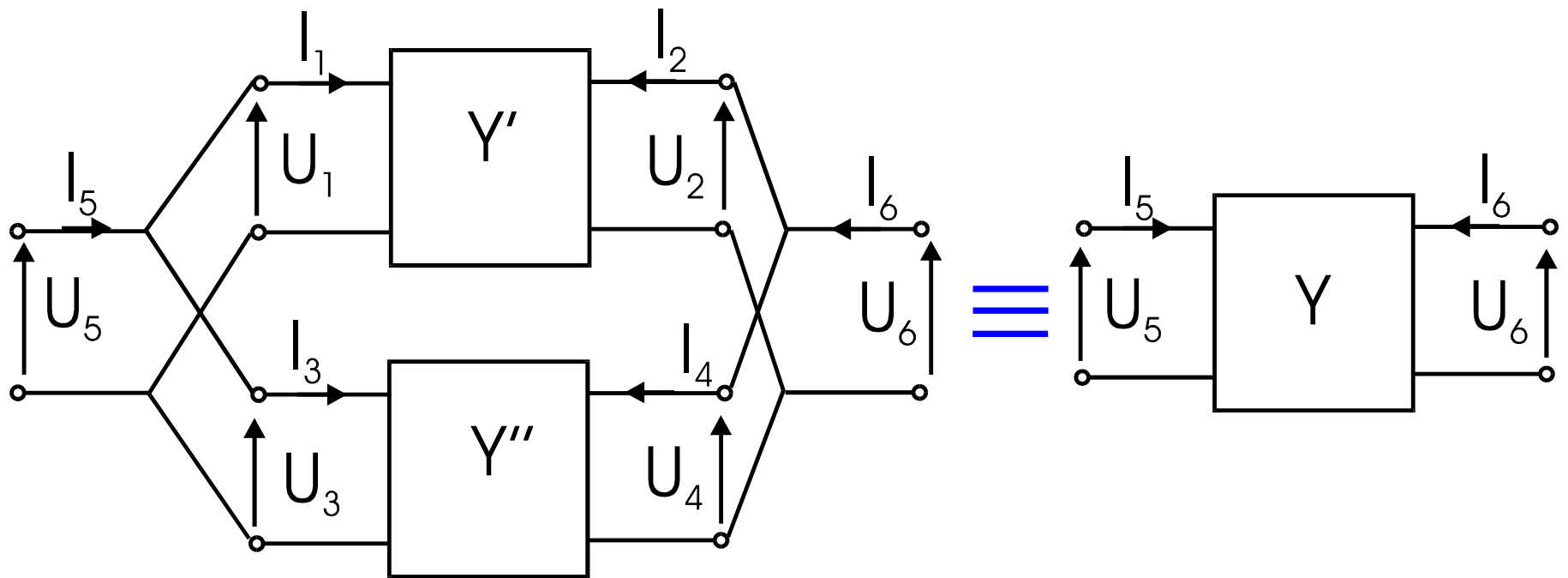
- Badanie regularności połączenia :



Jeżeli połączenie jest regularne to : $I_1 = I_3 = I_5$, $I_2 = I_4 = I_6$,

$$\begin{bmatrix} U_5 \\ U_6 \end{bmatrix} = \{ [Z'] + [Z''] \} \begin{bmatrix} I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \longrightarrow \boxed{[Z] = [Z'] + [Z'']}$$

Łączenie równoległe czwórników

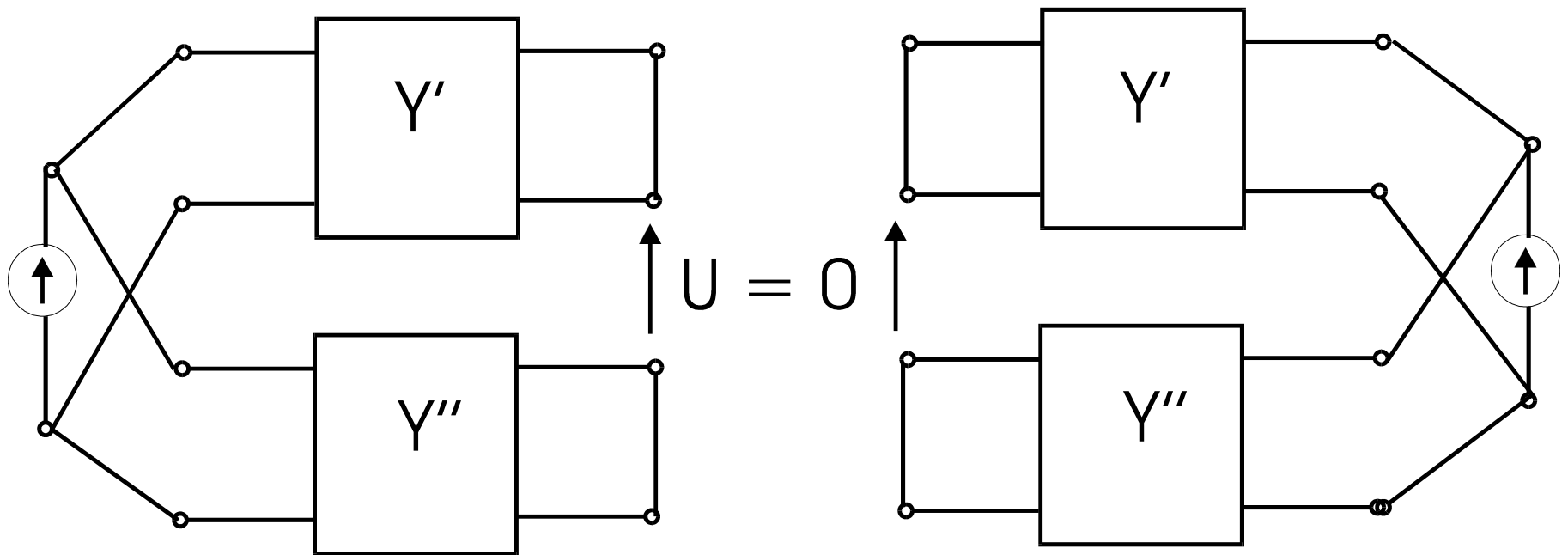


$$\left. \begin{aligned} I_5 &= I_1 + I_3 \\ I_6 &= I_2 + I_4 \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = [Y'] \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = [Y''] \begin{bmatrix} U_3 \\ U_4 \end{bmatrix}$$

Łączenie równoległe czwórników

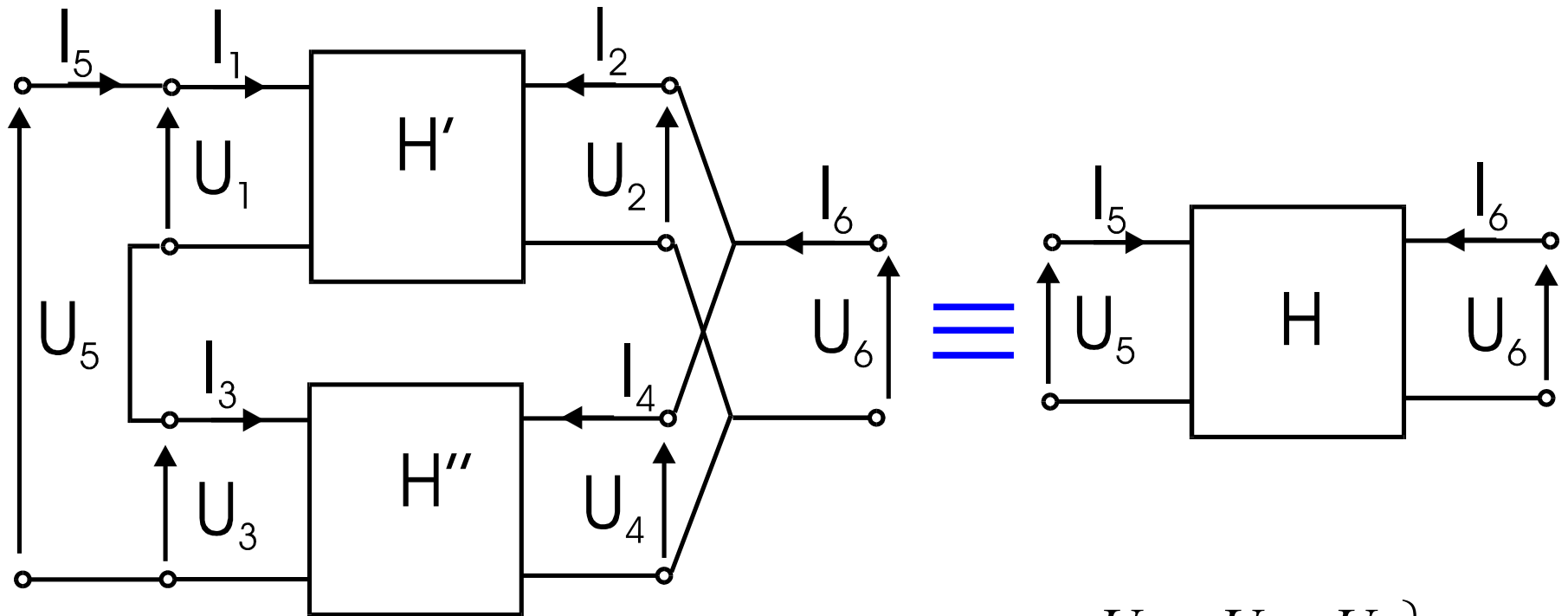
- Badanie regularności połączenia :



Jeżeli połączenie jest regularne to: $U_1 = U_3 = U_5$, $U_2 = U_4 = U_6$,

$$\begin{bmatrix} I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \{ [Y'] + [Y''] \} \begin{bmatrix} U_5 \\ U_6 \end{bmatrix} \longrightarrow \boxed{[Y] = [Y'] + [Y'']}$$

Łączenie szeregowo-równoległe czwórników



$$\left. \begin{aligned} U_5 &= U_1 + U_3 \\ I_6 &= I_2 + I_4 \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = [H'] \begin{bmatrix} I_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} U_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = [H''] \begin{bmatrix} I_3 \\ U_4 \end{bmatrix}$$

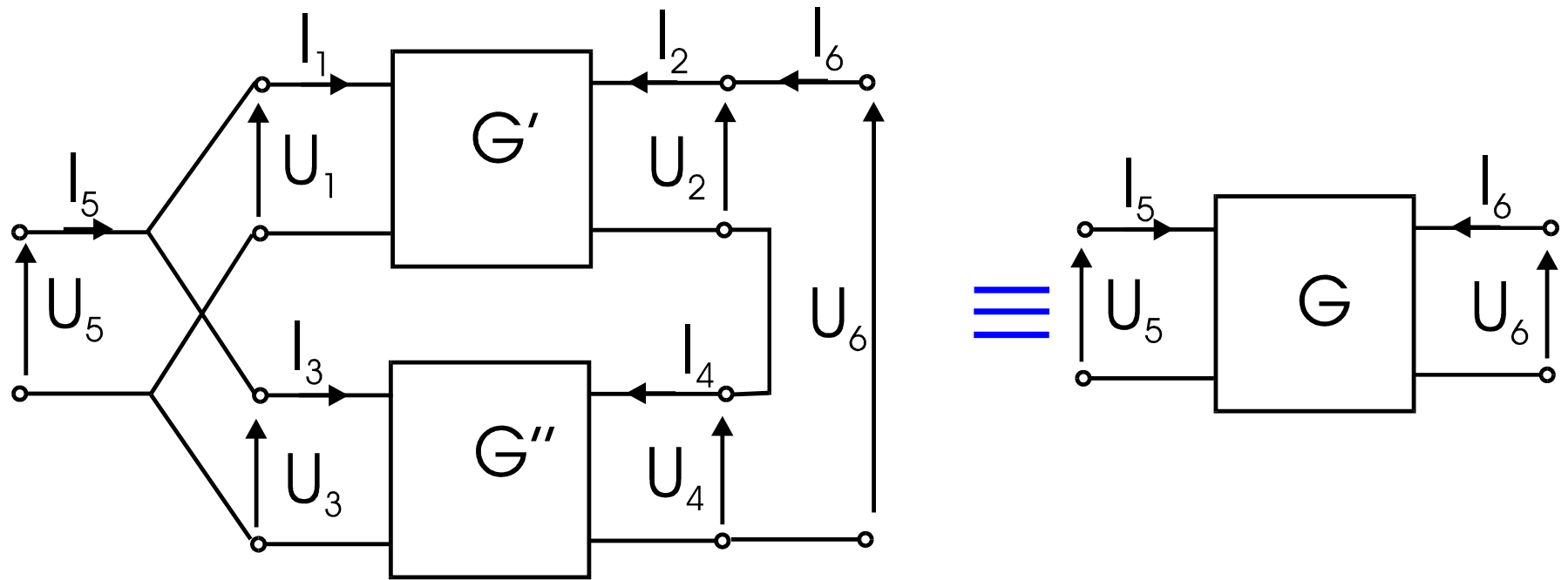
Łączenie szeregowo-równoległe czwórników

Badanie regularności połączenia w taki sposób jak przy poprzednich połączeniach.

Jeżeli połączenie jest regularne to: $I_1 = I_3 = I_5$, $U_2 = U_4 = U_6$,

$$\begin{bmatrix} U_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} H' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H'' \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} I_5 \\ U_6 \end{bmatrix} \longrightarrow \boxed{\begin{bmatrix} H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H'' \end{bmatrix}}$$

Łączenie równoległo-szeregowe czwórników



$$\left. \begin{aligned} I_5 &= I_1 + I_3 \\ U_6 &= U_2 + U_4 \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = [G'] \begin{bmatrix} U_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} I_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = [G''] \begin{bmatrix} U_3 \\ I_4 \end{bmatrix}$$

Łączenie równoległo-szeregowe czwórników

Badanie regularności połączenia w taki sposób jak przy poprzednich połączeniach.

Jeżeli połączenie jest regularne to: $U_1 = U_3 = U_5$, $I_2 = I_4 = I_6$,

$$\begin{bmatrix} I_5 \\ U_6 \end{bmatrix} = \{[G'] + [G'']\} \begin{bmatrix} U_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \longrightarrow \boxed{[G] = [G'] + [G'']}$$