



Politechnika Wrocławska
Instytut Telekomunikacji, Teleinformatyki i Akustyki



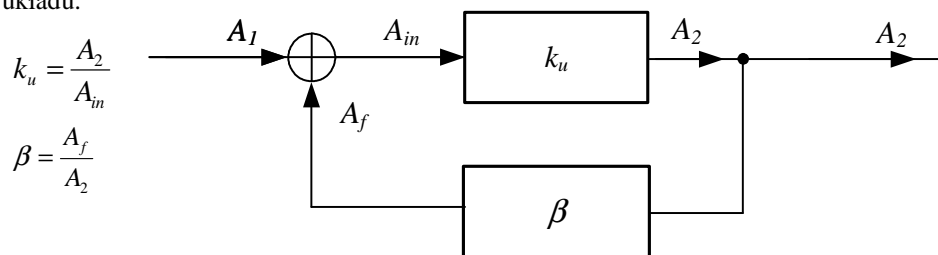
Sprzężenie zwrotne

Wrocław 2006



Sprzężenie zwrotne

Sprzężenie Zwrotne to oddziaływanie odpowiedzi układu (sygn. wyjściowego) na sygnał wejściowy realizowane jest przez sumowanie sygn. wyj. z sygn. wej. i użycie tej kombinacji do sterowania układu. Skutkiem działania **SZ** jest modyfikacja właściwości układu.



$$k_{uf} = \frac{A_2}{A_1} = \frac{A_2}{A_{in} - A_f} = \frac{A_2}{A_{in}} \frac{1}{1 - \frac{A_2}{A_{in}} \frac{A_f}{A_2}} = \frac{k_u}{1 - k_u \beta} = \frac{k_u}{1 + T} = \frac{k_u}{F}$$

T – wzmacnienie pętli
 F – różnica zwrotna



Sprzężenie zwrotne

Elementarna Teoria Sprzężenia Zwrotnego - ETSZ

Założenia ETSZ :

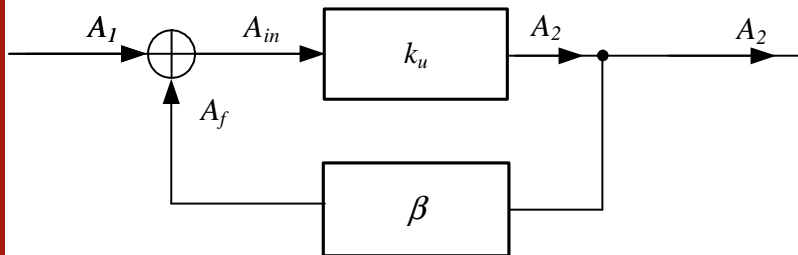
1. Możliwe jest podzielenie układu z **SZ** na dwie części:
 - blok wzmacniacza k_u (przenoszącego sygnał od wej. do wyj.),
 - blok sprzężenia β dostarczającego część sygnału wyj. z powrotem do jego wej.
2. Obydwa bloki są układami liniowymi (bloki unilateralne),
3. Blok β nie obciąża bloku k_u .

Żaden z rzeczywistych układów elektronicznych nie spełnia w pełni założeń ETSZ. Stąd wyniki analizy uzyskane za pomocą tej metody mają charakter przybliżony i mogą być stosowane tylko do pewnych grup układów, w których wzmocnienie toru wzmacniacza jest duże a sprzężenie zwrotne jest niezbyt silne.



Sprężenie zwrotne

Rodzaje SZ



$$k_{uf} = \frac{k_u}{1+T} = \frac{k_u}{F}$$

$|F| > 1$ to SZ – **Ujemne SZ** - podstawowe w układach wzmacniaczy

$|F| < 1$ to SZ + **Dodatnie SZ** - stosowane głównie w układach generacyjnych, natomiast w układach wzmacniaczy, ze względu na swoje liczne wady (głównie niestaość parametrów), stosowane bardzo rzadko, zazwyczaj łącznie ze SZ–.



Sprzężenie zwrotne

„SZ –” - właściwości

Zalety SZ –

- ⇒ obniża wpływ zmian parametrów elementów aktywnych, warunków zasilania, czynników zewnętrznych na parametry układu (zmniejsza wrażliwość wzmacnienia),
- ⇒ polepsza liniowość układów elektronicznych (zmniejsza zniekształcenia nieliniowe),
- ⇒ poprawia stałość p.p. – sprzężenie dla prądu DC,
- ⇒ umożliwia kształtowanie charakterystyk częstotliwościowych (zwiększa pasmo),
- ⇒ umożliwia zmianę poziomu impedancji wejściowej i wyjściowej.

Wady SZ –

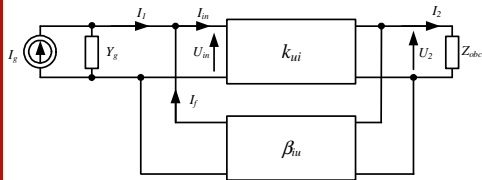
- ⇒ zmniejsza wzmacnienie układu (k_{uskf} , k_{usk})



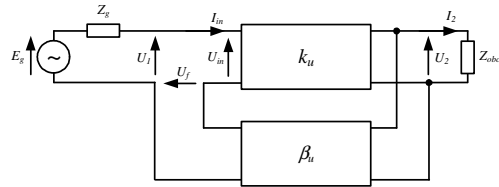
Sprzężenie zwrotne

„SZ –” - podstawowe struktury

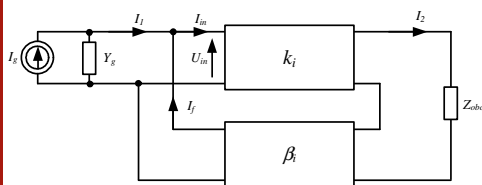
napięciowe-równoległe



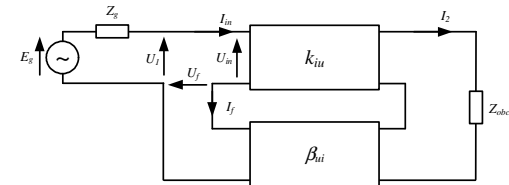
napięciowe-szeregowe



prądowo-równoległe



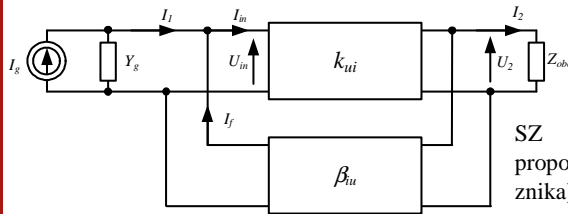
prądowo-szeregowe



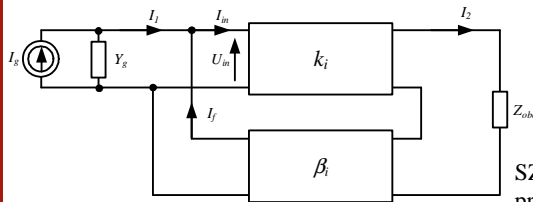


Sprzężenie zwrotne

„SZ –” - podstawowe struktury



SZ napięciowe – sygnały zwrotny jest proporcjonalny do U_2 (gdy $U_2 = 0$ to sprzężenie znika)

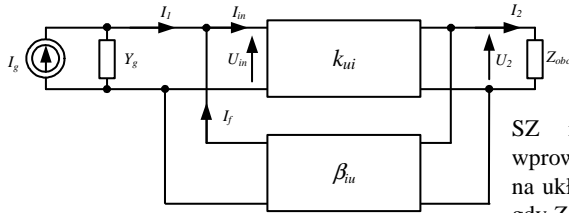


SZ prądowe – sygnały zwrotny jest proporcjonalny do I_2 (gdy $I_2 = 0$ to sprzężenie znika)

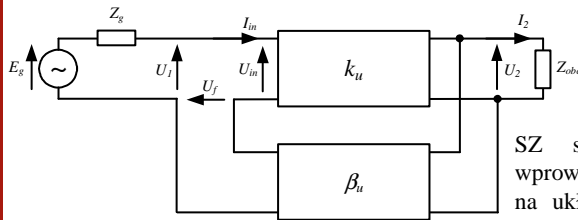


Sprzężenie zwrotne

„SZ –” - podstawowe struktury



SZ równoległe – sygnały zwrotny jest wprowadzany równoległe z wejściem. Oddziałuje na układ gdy generator ma ch-er prądowy (znika gdy $Z_g = 0$)



SZ szeregowe – sygnały zwrotny jest wprowadzany w szereg z wejściem. Oddziałuje na układ gdy generator ma ch-er napięciowy (znika gdy $Z_g = \infty$)



Sprężenie zwrotne

„SZ –” transmitancje bloków - modele idealnych bloków β

SZ napięciowe-równoległe

$$k = \frac{U_2}{I_{in}} = k_{ui} \quad \beta = \frac{I_f}{U_2} = \beta_{ui}$$

SZ napięciowe-szeregowe

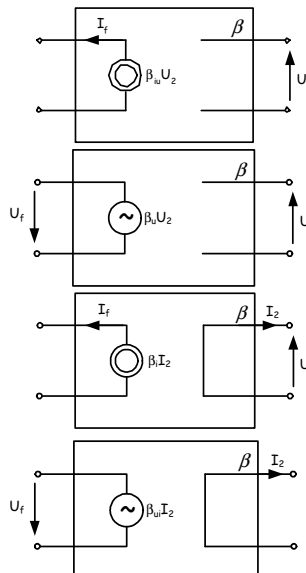
$$k = \frac{U_2}{U_{in}} = k_u \quad \beta = \frac{U_f}{U_2} = \beta_u$$

SZ prądowo-równoległe

$$k = \frac{I_2}{I_{in}} = k_i \quad \beta = \frac{U_f}{I_2} = \beta_{ui}$$

SZ prądowo-szeregowe

$$k = \frac{I_2}{U_{in}} = k_{iu} \quad \beta = \frac{U_f}{I_2} = \beta_{ui}$$





Sprzężenie zwrotne

Wpływ SZ na wrażliwość wzmocnienia

Jest pożądane by moduł wzmocnienia pętli $k\beta$ był znacznie większy od jedności, wówczas wyraźnie występują pozytywne skutki działania SZ.

Jeśli $|k\beta| \gg 1$ to w układzie mamy silne SZ.

Przy silnym SZ wzmocnienie układ ze SZ k_{uf} mało zależy od wzmocnienia wzmacniacza k_u .

$$k_{uf} = \frac{k_u}{1 - k_u\beta} = -\frac{1}{\beta} \frac{1}{1 - \frac{1}{k_u\beta}} \approx -\frac{1}{\beta}$$

Czwórnik β zwykle zbudowany z elementów biernych, których stałość jest znacznie lepsza niż stałość wzmocnienia k_u .

Uniezależnienie k_{uf} od k_u jest jednym z najważniejszych skutków działania SZ i jednym z głównych powodów jego stosowania w układach analogowych.



Sprężenie zwrotne

Wpływ SZ na liniowość układu

Widmo sygnału wyjściowego układu liniowego zawiera składowe o takich samych f jakie ma widmo sygnału wejściowego. W praktyce jednak nie ma układów liniowych i każdy układ wytwarza składowe harmoniczne sygnału wejściowego. Miarą nieliniowości jest współczynnik zawartości harmonicznych h .

$$h = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1}$$

gdzie U_i jest wartością skuteczną składowej o częstotliwości if .

Współczynnik zawartości harmonicznych h jest powszechnie stosowany do oceny jakości układów w paśmie częstotliwości akustycznych. Dobre (tzn. liniowe) układy powinny mieć $h \ll 1\%$.

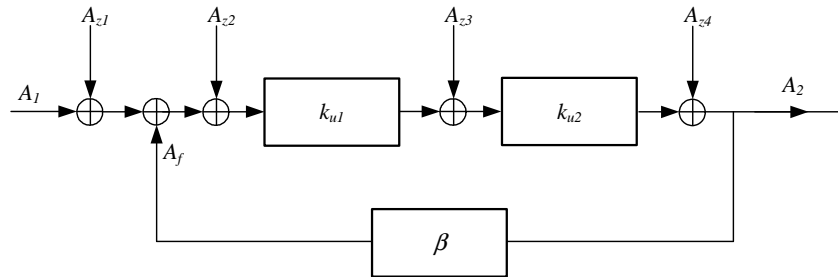
Dla układu ze SZ możemy zapisać:

$$h_f \approx \frac{h}{1 - k_u \beta}$$



Sprzężenie zwrotne

Wpływ SZ na zakłócenia i szumy



$$A_2 = \frac{(A_1 + A_{z1} + A_{z2})k_{u1}k_{u2}}{1 - \beta k_{u1}k_{u2}} + \frac{A_{z3}k_{u2}}{1 - \beta k_{u1}k_{u2}} + \frac{A_{z4}}{1 - \beta k_{u1}k_{u2}}$$

$A_{z1} - A_{z4}$ - sygnały zakłócające

SZ nie tłumi szumów i zakłóceń wytwarzanych w źródle

SZ tłumi zakłócenia i szumy w układzie tym bardziej im bliżej wyjścia znajduje się źródło zakłóceń (A_{z4} jest tłumiony najbardziej).

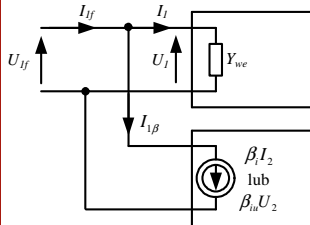


Sprężenie zwrotne

Wpływ SZ na impedancję wejściową wzmacniacza

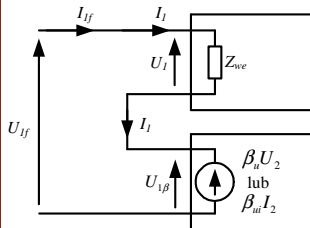
Wpływ SZ na Z_{we} zależy od rodzaju SZ.

SZ równoległe (napięciowe i prądowe) zmniejsza Z_{we} .



$$Z_{wef} = \frac{Z_{we}}{(1 - k\beta)}$$

SZ szeregowe (napięciowe i prądowe) zwiększa Z_{we} .



$$Z_{wef} = Z_{we} (1 - k\beta)$$

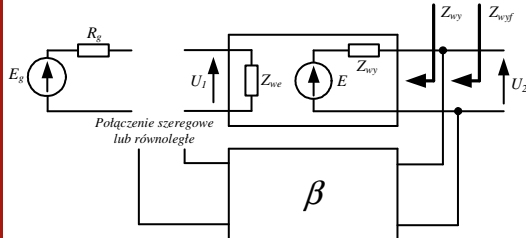


Sprężenie zwrotne

Wpływ SZ na impedancję wyjściową wzmacniacza

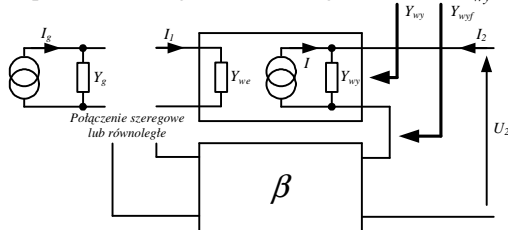
Wpływ SZ na Z_{wy} zależy od rodzaju SZ.

SZ napięciowe (szeregowe i równoległe) zmniejsza Z_{wy} .



$$Z_{wyf} = \frac{Z_{wy}}{(1 - k\beta)}$$

SZ prądowe (szeregowe i równoległe) zwiększa Z_{wy} .



$$Z_{wyf} = Z_{wy} (1 - k\beta)$$



Sprężenie zwrotne

Wpływ SZ na impedancje i wzmacnienia wzm.

sprężenie parametr	N – S	P – S	N – R	P – R
k_{uskf} k_{iskf} k_{pskf}				
k_{uf}			=	=
k_{if}	=	=		
Z_{wef}				
Z_{wyf}				
F	$1 - k_u \beta_u$	$1 - k_{iu} \beta_{ui}$	$1 - k_{ui} \beta_{iu}$	$1 - k_i \beta_i$



Sprzężenie zwrotne

Wpływ SZ na ch-yki częstotliwościowe wzmacniacza

Transmitancja jednego stopnia wzmacniacza:

$$k(j\omega) = -\frac{k_{u0}}{\left(1 + \frac{\omega_d}{j\omega}\right)\left(1 + \frac{j\omega}{\omega_g}\right)} \quad \omega_d, \omega_g - \text{dolna i górna częśc. graniczna}$$

gdy $\omega \gg \omega_d$

$$k(j\omega) \approx -\frac{k_{u0}}{1 + \frac{j\omega}{\omega_g}}$$

Dla układu ze SZ

$$k_f(j\omega) \approx -\frac{k_{u0f}}{1 + \frac{j\omega}{\omega_{gf}}}$$

gdzie

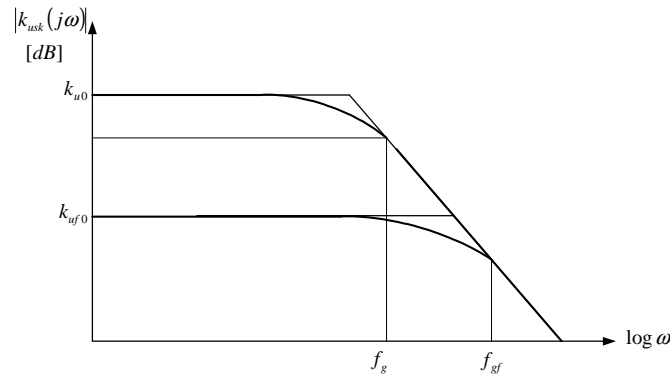
$$k_{uf} = \frac{k_{u0}}{1 - \beta k_{u0}} \quad \omega_{gf} = \omega_g (1 - \beta k_{u0})$$



Sprężenie zwrotne

Wpływ SZ na ch-yki częstotliwościowe wzmacniacza

SZ powoduje wzrost górnej częstotliwości granicznej tyle razy, ile razy zmniejszy się wzmocnienie w zakresie częstotliwości średnich.



Iloczyn modułu wzmocnienia dla częstotliwości średnich i górnej częstotliwości granicznej nazywamy polem wzmocnienia – **pole to pozostaje stałe**.



Sprzężenie zwrotne

Stabilność układów ze SZ

Korzystne działanie SZ (zmniejszenie wrażliwości, redukcja zniekształceń i zakłóceń) występują tym wyraźniej im większe jest wzmocnienie pętli T , czyli im więcej stopni wzmacniacza jest objętych SZ.

Im więcej stopni jest objętych SZ zwiększa się przesunięcie fazowe w pętli SZ przez co może zmienić się charakter SZ z ujemnego na dodatni, a w konsekwencji może również wystąpić generacja w układzie wzmacniacza.

Utrata stabilności występuje w układach, w których przesunięcie fazy w pętli SZ jest większe od 180° .

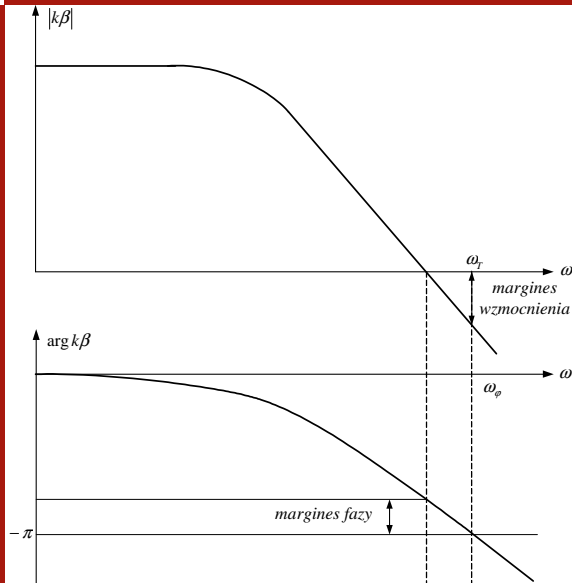
Ocena stabilności układu kryterium Nyquista lub kryterium Bodego.

Warunek stabilności można sprawdzić korzystając z ch-yk częstotliw. dla otwartej pętli $T(j\omega) = k\beta$



Sprzężenie zwrotne

Stabilność układów ze SZ – kryterium Bodego



Sprawdzamy czy dla pulsacji $\omega = \omega_\phi$ przy której $\arg T(j\omega_\phi) = -\pi$ moduł $T(j\omega_\phi)$ jest większy (układ niestabilny) lub mniejszy (układ stabilny) od jedności (0dB).

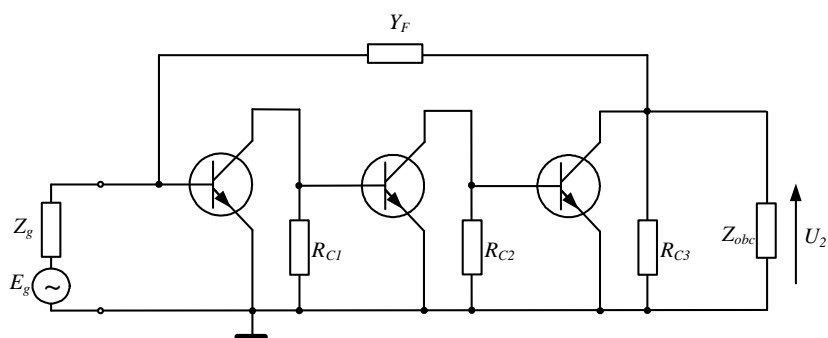
Sprawdzamy czy dla pulsacji $\omega = \omega_T$, przy której $|T(j\omega_T)| = 1$ (0dB) wartość fazy $\arg T(j\omega_T)$ jest mniejsza od π (układ stabilny) lub większy od π (układ niestabilny).



Sprężenie zwrotne

Przykłady wzmacniaczy ze „SZ –”

Napięciowo równoległe

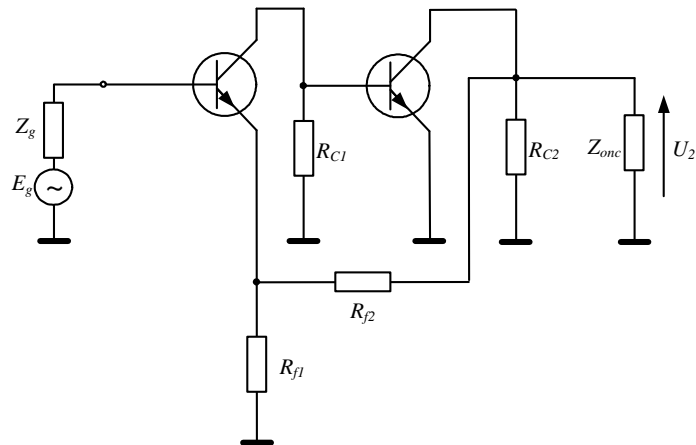




Sprężenie zwrotne

Przykłady wzmacniaczy ze „SZ –”

Napięciowo szeregowo

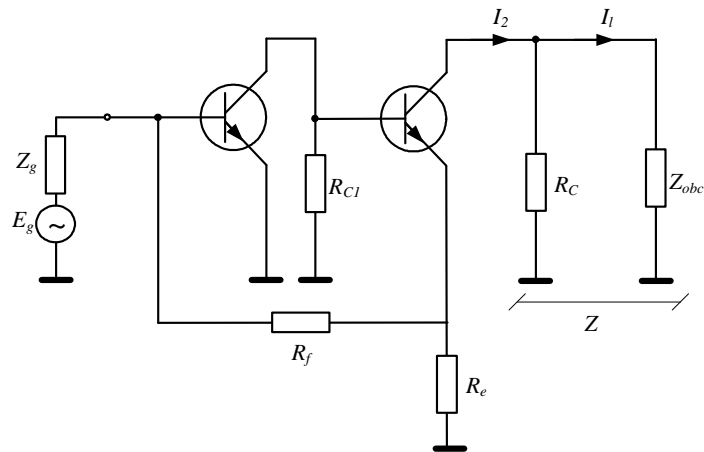




Sprężenie zwrotne

Przykłady wzmacniaczy ze „SZ –”

Prądowo równoległe





Sprężenie zwrotne

Przykłady wzmacniaczy ze „SZ –”

Prądowo szeregowo

