

11 SPRZĘŻENIE ZWROTNE

11.1. UWAGI OGÓLNE

Układ ze sprzężeniem zwrotnym charakteryzuje się tym, że występuje w nim oddziaływanie zwrotne sygnału wyjściowego. Część sygnału wyjściowego, zwana *sygnałem zwrotnym*, przekazywana jest z wyjścia na wejście układu, gdzie sumuje się z sygnałem wejściowym, modyfikując warunki sterowania.

Jeśli w wyniku sprzężenia zwrotnego (ang. *feedback*) wzmocnienie układu ulega zmniejszeniu (tzn. sygnał zwrotny zmniejsza efektywny sygnał wejściowy), to sprzężenie zwrotne nazywa się *sprzężeniem ujemnym* (USZ), w przeciwnym przypadku - *sprzężeniem zwrotnym* jest *dodatnie* (DSZ).

W liniowych układach elektronicznych ujemne sprzężenie zwrotne jest ważnym czynnikiem umożliwiającym uzyskanie pożądanej poprawy parametrów roboczych i właściwości układu.

W szczególności ujemne sprzężenie zwrotne pozwala uzyskać:

- zmniejszenie wrażliwości wzmocnienia na zmiany parametrów elementów składowych, warunków zasilania, czynników zewnętrznych itp.,
- zmniejszenie zniekształceń nieliniowych oraz wpływu zakłóceń,
- kontrolowaną zmianę poziomu impedancji wejściowej i wyjściowej,
- możliwość kształtowania charakterystyk częstotliwościowych bądź impulsowych wzmacniacza.

Dodatnie sprzężenie zwrotne jest stosowane głównie w układach generacyjnych, natomiast w układach wzmacniających jest stosowane rzadko, zazwyczaj łącznie ze sprzężeniem ujemnym.

Każdy układ ze sprzężeniem zwrotnym zawiera zamkniętą drogę sygnału z wejścia na wyjście, zwaną *pętlą sprzężenia zwrotnego*.

Zależnie od liczby takich elementarnych pętli można rozróżnić:

1. układy z pojedynczą pętlą sprzężenia zwrotnego,
2. układy wielopętlowe.

Dokonując podziału sprzężeń zwrotnych ze względu na ilość stopni objętych działaniem pętli sprzężenia zwrotnego możemy wyróżnić:

1. *sprzężenie lokalne* - obejmujące jeden stopień,
2. *sprzężenia międzystopniowe* - obejmujące dwa lub więcej stopni.

W ogólnym przypadku w układzie wzmacniającym ze

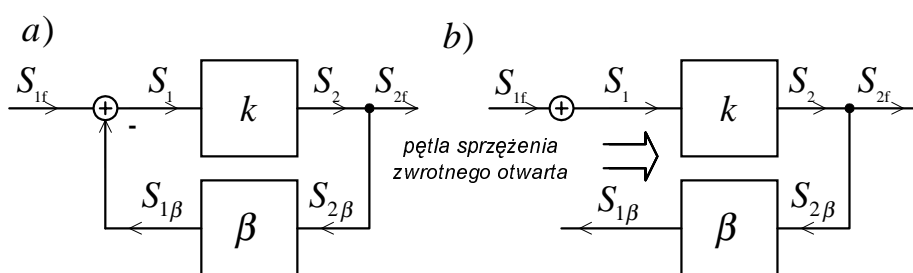
sprężeniem zwrotnym trudno jest wyodrębnić wzajemnie niezależne, jednokierunkowe torry wzmocnienia (transmisji sygnału z wejścia na wyjście) i sprzężenia zwrotnego (transmisji sygnału z wyjścia na wejście). Wynika to z jednej strony z bilateralnego charakteru elementów wzmacniających, z drugiej - z dwukierunkowej transmisji w torze sprzężenia zwrotnego (najczęściej biernym), jak również wzajemnie obciążającego działania obu torów.

W dalszych rozważaniach posłużymy się przybliżoną, elementarną metodą analizy, polegającą na wyodrębnianiu obu torów, przy założeniu, że są one wzajemnie od siebie niezależne. Stosowanie *elementarnej teorii sprzężenia zwrotnego* jest dopuszczalne tylko wtedy, gdy czwórnik wzmacniający o wzmocnieniu k oraz czwórnik sprzężenia zwrotnego o transmitancji β są zbliżone do unilateralnych (o przeciwnych kierunkach transmisji) i nie obciążają się wzajemnie.

Elementarna teoria oparta na tym założeniu ma duże znaczenie praktyczne ze względu na swoją prostotę, łatwość określenia i kontroli wielkości sprzężenia, możliwość prostego porównania parametrów roboczych układu bez- i ze sprzężeniem zwrotnym.

11.2. ELEMENTARNA TEORIA SPRĘŻENIA ZWROTNEGO

W myśl założeń upraszczających teorii elementarnej układ liniowy z pojedynczą pętlą sprzężenia zwrotnego może być przedstawiony w postaci dwóch wzajemnie od siebie niezależnych czwórników reprezentujących tor wzmocnienia i tor sprzężenia zwrotnego (rys.11.1).



Rys.11.1 Wzmacniacz z zamkniętą (a) i otwartą (b) pętlą sprzężenia zwrotnego

Wzmocnienie układu bez sprzężenia zwrotnego jest równe

$$k = \frac{S_2}{S_1} \quad (11.1)$$

zaś funkcja przenoszenia toru sprzężenia zwrotnego jest określona przez

$$\beta = \frac{S_{1\beta}}{S_{2\beta}} \quad (11.2)$$

Ponieważ na wyjściu wzmacniacza

$$S_{2f} = S_2 = S_{2\beta} \quad (11.3)$$

oraz w węźle sumacyjnym

$$S_{1f} - S_{1\beta} = S_1 \quad (11.4)$$

zatem na podstawie równań (11.1–11.4) wzmocnienie układu ze sprzężeniem zwrotnym wynosi

$$k_f = \frac{S_{2f}}{S_{1f}} = \frac{k}{1 + \beta k} \quad (11.5)$$

Wielkość $T = k\beta$ nosi nazwę *stosunku zwrotnego* i określa wzmocnienie układu z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego (rys.11.1b).

Na podstawie rys.11.1b otrzymujemy

$$\begin{aligned} S_2 &= S_1 k = S_{2\beta} \\ S_{1\beta} &= \beta S_{2\beta} \end{aligned} \quad (11.6)$$

Stąd

$$T = \frac{S_{1\beta}}{S_1} = k\beta \quad (11.7)$$

Wielkość $F = 1 + T = 1 + k\beta$ nosi nazwę *różnicy zwrotnej* lub *współczynnika sprzężenia zwrotnego* i jest miarą wielkości sprzężenia zwrotnego jakim objęty jest wzmacniacz k .

Gdy $|k_f| < |k| \rightarrow |1 + \beta k| > 1$, to sprzężenie zwrotne jest ujemne (USZ).

Gdy $|k_f| > |k| \rightarrow |1 + \beta k| < 1$, to sprzężenie zwrotne jest dodatnie (DSZ).

Jeżeli współczynnik sprzężenia zwrotnego jest rzeczywisty, to *sprzężenie zwrotne jest czysto ujemne bądź czysto dodatnie*, co oznacza, że sygnał zwrotny $S_{1\beta}$ jest w przeciwfazie lub w fazie z sygnałem wejściowym.

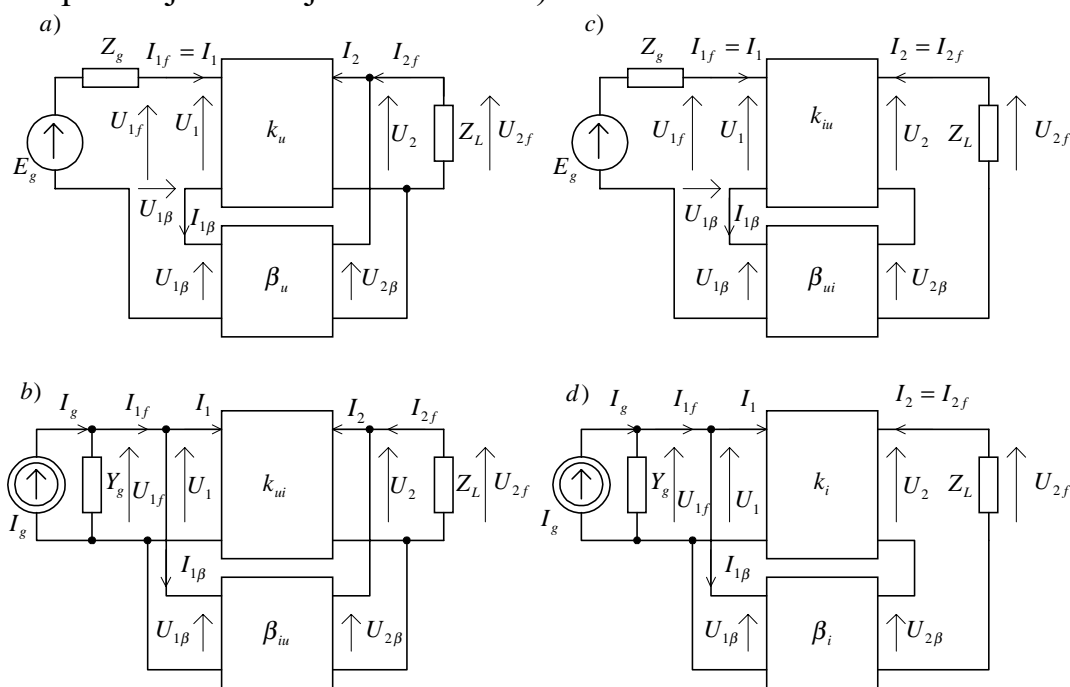
Rodzaj i właściwości zastosowanego sprzężenia zwrotnego są zależne od sposobu pobierania sygnału zwrotnego z wyjścia układu oraz sposobu wprowadzania go na wejście. Dokonując podziału ze względu na sposób pobierania sygnału zwrotnego z wyjścia wzmacniacza możemy wyróżnić:

- *sprzężenie zwrotne napięciowe*, w którym sygnał zwrotny jest proporcjonalny do napięcia wyjściowego (gdy napięcie wyjściowe $U_{2f} = 0$, to sygnał zwrotny $U_{2\beta} = 0$),

- *sprężenie zwrotne prądowe*, w którym sygnał zwrotny jest proporcjonalny do prądu wyjściowego (gdy prąd wyjściowy $I_{2f} = 0$, to sygnał zwrotny $I_{2\beta} = 0$).

Dokonując z kolei podziału ze względu na sposób wprowadzania sygnału przez czwórnik sprzężenia zwrotnego na wejście wzmacniacza możemy wyróżnić:

- *sprężenie zwrotne szeregowe*, w którym sygnał zwrotny jest wprowadzany w szereg z wejściem. Oddziałuje on na układ, gdy generator sygnału ma charakter napięciowy (tzn. sprzężenie zwrotne zanika, gdy impedancja źródła jest nieskończenie wielka),
- *sprężenie zwrotne równoległe*, w którym sygnał zwrotny jest wprowadzany równoległe z wejściem. Oddziałuje on na układ, gdy generator ma charakter prądowy (tzn. sprzężenie zwrotne zanika, gdy impedancja źródła jest równa zero).



Rys.11.2 Podstawowe układy sprzężenia zwrotnego:

- a) napięciowe - szeregowe, b) napięciowe - równoległe,
c) prądowe - szeregowe, d) prądowe - równoległe

Z omówionych kombinacji połączenia czwórników k i β na wejściu i wyjściu wynikają cztery podstawowe układy sprzężenia zwrotnego:

- *napięciowe - szeregowe* (rys.11.2a),
- *napięciowe - równoległe* (rys.11.2b),
- *prądowe - szeregowe* (rys.11.2c),
- *prądowe - równoległe* (rys.11.2d).

Transmitancje k i β mają różną postać dla różnych rodzajów sprzężenia, zależnie od tego jakie sygnały są rozważane na wejściu i na wyjściu układu.

I tak, zgodnie z oznaczeniami na rys.11.2, otrzymujemy dla sprzężenia napięciowego - szeregowego

$$k = \frac{U_2}{U_1} = k_u, \quad \beta = \frac{U_{1\beta}}{U_2} = \frac{U_{1\beta}}{U_{2f}} = \beta_u \quad (11.8)$$

dla sprzężenia napięciowego - równoległego

$$k = \frac{U_{2f}}{I_1} = r_m = k_{ui}, \quad \beta = \frac{I_{1\beta}}{U_{2\beta}} = \beta_{iu} \quad (11.9)$$

dla sprzężenia prądowego - szeregowego

$$k = \frac{I_{2f}}{U_1} = g_m = k_{iu}, \quad \beta = \frac{U_{1\beta}}{I_{2f}} = \beta_{ui} \quad (11.10)$$

dla sprzężenia prądowego - równoległego

$$k = \frac{I_{2f}}{I_1} = k_i, \quad \beta = \frac{I_{1\beta}}{I_{2f}} = \beta_i \quad (11.11)$$

11.3. WPŁYW SPRZĘŻENIA ZWROTNEGO NA WŁAŚCIWOŚCI WZMACNIACZY

1.3.1. Wpływ sprzężenia zwrotnego na wrażliwość wzmocnienia

Wrażliwość jest miarą zależności dowolnego parametru roboczego układu (np. wzmocnienia) od wartości innego parametru (np. współczynnika β_0 tranzystora zastosowanego we wzmacniaczu), czyli określa stopień stałości danego parametru roboczego.

Zakładając, że wzmocnienie jest wielkością rzeczywistą (rozważając np. zakres średnich częstotliwości) wrażliwości wzmocnienia w układzie bez i ze sprzężeniem zwrotnym względem tego samego parametru p_i wynoszą

$$S_{p_i}^k = \frac{\frac{\partial k}{\partial p_i}}{k}; \quad S_{p_i}^{k_f} = \frac{\frac{\partial k_f}{\partial p_i}}{k_f} \quad (11.12)$$

Z zależności (11.5) wynika

$$dk_f = \frac{dk}{(1 + \beta k)^2} \quad (11.13)$$

$$\frac{dk_f}{k_f} = \frac{1}{1 + \beta k} \frac{dk}{k} \quad (11.14)$$

Z zależności (11.12) i (11.14) otrzymujemy

$$S_{p_i}^{k_f} = \frac{S_{p_i}^k}{1 + \beta k}$$

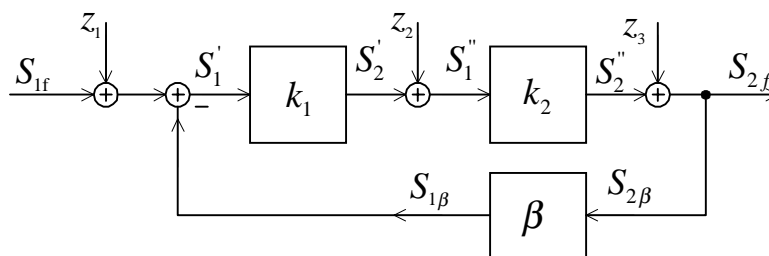
W przypadku sprzężenia czysto ujemnego czułość wzmocnienia ulega redukcji, podobnie jak samo wzmocnienie. W granicznym przypadku silnego ujemnego sprzężenia zwrotnego ($k\beta \gg 1$) z zależności (11.5) otrzymuje się wprost

$$k_f = \frac{1}{\beta} \quad (11.15)$$

tzn. wzmocnienie staje się niezależne od aktywnych elementów użytych w torze wzmacniającym i jego stałość, przy zastosowaniu biernych obwodów sprzężenia zwrotnego, może być bardzo duża.

11.3.2. Wpływ ujemnego sprzężenia zwrotnego na zniekształcenia nieliniowe, zakłócenia i szumy

Rozpatrzmy przykładowo wzmacniacz przedstawiony na rys.11.3, w którym zaznaczono sygnały powstałe na skutek nieliniowości, zakłóceń bądź szumów.



Rys.11.3 Wzmacniacz ze sprzężeniem zwrotnym z uwzględnieniem wpływu sygnałów szkodliwych

Sygnały szkodliwe zaznaczono w następujących miejscach ich powstawania:

z_1 - na wejściu wzmacniacza,

z_2 - wewnątrz pętli sprzężenia zwrotnego,

z_3 - na wyjściu wzmacniacza, w miejscu gdzie pobierany jest sygnał przez pętlę USZ.

Współczynnik sprzężenia zwrotnego jest jednakowy dla wszystkich punktów wewnątrz pętli sprzężenia i równy $1 + k_1 k_2 \beta$, natomiast wzmocnienia w układzie z otwartą pętlą są różne i wynoszą odpowiednio $k_1 k_2$ dla sygnałów S_{1f} i z_1 , k_2 - dla sygnału z_2 oraz 1 dla sygnału z_3 .

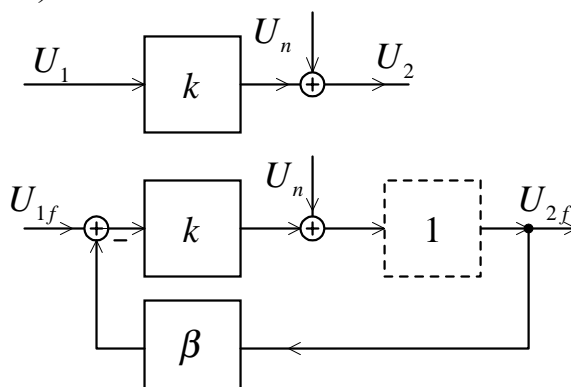
Tak więc sygnał wyjściowy jest równy

$$S_{2f} = (S_{1f} + z_1) \frac{k_1 k_2}{1 + k_1 k_2 \beta} + z_2 \frac{k_2}{1 + k_1 k_2 \beta} + z_3 \frac{1}{1 + k_1 k_2 \beta} \quad (11.16)$$

Udział sygnałów szkodliwych z_2 i z_3 na wyjściu układu jest zredukowany w stosunku równym odpowiednio k_1 i $k_1 k_2$. Wpływ sygnałów szkodliwych powstałych wewnątrz pętli sprzężenia zwrotnego jest zmniejszony i to tym bardziej, im bliżej wyjścia one powstają. Zakłócenia i szumy z_1 powstałe na wejściu układu są redukowane w tym samym stosunku co sygnał użyteczny S_{1f} , zatem ujemne sprzężenie zwrotne nie poprawia stosunku sygnału do szumu.

Zależność (11.16) jest słuszna także dla poszczególnych harmonicznych powstałych na wyjściu wskutek nieliniowości ostatniego stopnia.

Rozpatrując dwa wzmacniacze o tym samym wzmocnieniu k , przy czym jeden z nich jest objęty pętlą sprzężenia zwrotnego β , to przy tych samych amplitudach napięć na wyjściach obydwu wzmacniaczy (sygnały wejściowe różnią się $U_1 < U_{1f}$) otrzymujemy mniejsze zniekształcenia nieliniowe w układzie z ujemnym sprzężeniem zwrotnym (rys.11.4).



Rys.11.4. Zniekształcenia nieliniowe we wzmacniaczach bez i z ujemnym sprzężeniem zwrotnym

Zakładając dla uproszczenia, że w wyniku nieliniowości wzmacniacza na jego wyjściu generowane są harmoniczne sygnały, o podobnym charakterze do rozpatrywanych wcześniej sygnałów zakłócających, dla układu bez sprzężenia zwrotnego otrzymujemy

$$U_2 = kU_1 + U_n \quad (11.17)$$

zaś dla układu z ujemnym sprzężeniem zwrotnym

$$U_{2f} = U_{1f} \frac{k}{1 + k\beta} + U_n \frac{1}{1 + k\beta} \quad (11.18)$$

Stąd

$$U_{nf} = U_n \frac{1}{1 + k\beta} \quad (11.19)$$

Zawartość harmoniczných h układu bez sprzężenia zwrotnego i h_f - ze sprzężeniem zwrotnym są związane zależnością

$$h_f = h \frac{1}{1 + k\beta} \quad (11.20)$$

Ujemne sprzężenie zwrotne powoduje zatem linearyzację odpowiedniej charakterystyki roboczej wzmacniacza.

Może się jednak zdarzyć, że dla częstotliwości rozpatrywanej harmonicznój sprzężenie zwrotne jest dodatnie (np. wskutek dodatkowych przesunień fazowych w pętli sprzężenia) i wtedy zawartość tej harmonicznój ulegnie zwiększeniu.

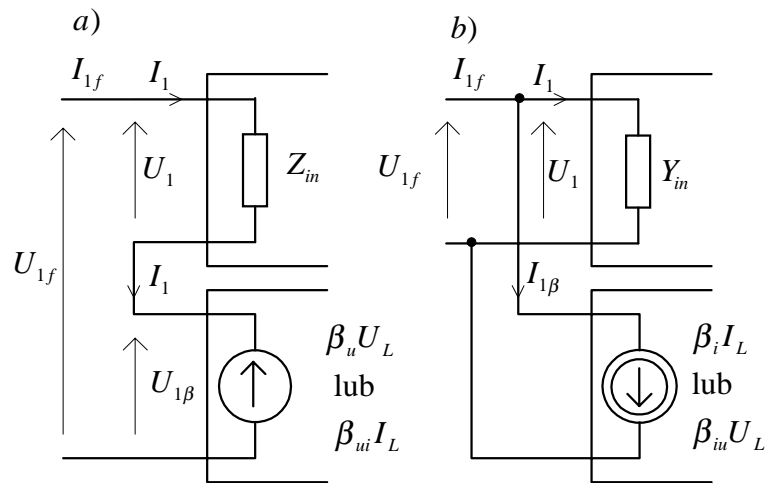
11.3.3. Wpływ ujemnego sprzężenia zwrotnego na impedancję wejściową wzmacniacza.

Wpływ ujemnego sprzężenia zwrotnego na impedancję wejściową zależy od rodzaju zastosowanego sprzężenia zwrotnego. Ujemne sprzężenie szeregowo (tj. napięciowe - szeregowo z rys.11.2a i prądowe - szeregowo z rys.11.2c) zwiększa impedancję wejściową, zaś ujemne sprzężenie równoległe (tj. napięciowe - równoległe z rys.11.2b i prądowe - równoległe z rys.11.2d) zwiększa admitancję wejściową układu. Na rys.11.5 przedstawiono obwody wejściowe wymienionych układów.

Dla obwodu wejściowego ze sprzężeniem zwrotnym szeregowym otrzymujemy

$$Z_{inf} = \frac{U_{1f}}{I_{1f}} = \frac{U_1 + U_{1\beta}}{I_1} = \frac{U_1}{I_1} \left(1 + \frac{U_{1\beta}}{U_1} \right) \quad (11.21)$$

Stosunek $U_{1\beta} / U_1$ jest wzmocnieniem otwartej pętli sprzężenia zwrotnego i może być wyznaczony jako $k_u \beta_u$ lub $k_i \beta_i$.



Rys.11.5 Obwód wejściowy układu ze sprzężeniem zwrotnym: a) szeregowym, b) równoległym

Zatem impedancja wejściowa układu z ujemnym sprzężeniem szeregowym określona jest zależnością

$$Z_{inf} = Z_{in}(1 + k_u \beta_u) = Z_{in}(1 + k_{iu} \beta_{ui}) \quad (11.22)$$

gdzie $Z_{in} = U_1 / I_1$ jest impedancją wzmacniacza bez sprzężenia zwrotnego.

Jak wynika z zależności (11.22), ujemne sprzężenie szeregowe zwiększa impedancję wejściową.

Dla obwodu wejściowego ze sprzężeniem zwrotnym równoległym (rys.11.5b) otrzymujemy

$$\begin{aligned} Y_{inf} &= \frac{1}{Z_{inf}} = \frac{I_{1f}}{U_{1f}} = \frac{I_1 + I_{1\beta}}{U_1} = \frac{I_1}{U_1} \left(1 + \frac{I_{1\beta}}{I_1} \right) = \\ &= Y_{in}(1 + k_i \beta_i) = Y_{in}(1 + k_{iu} \beta_{iu}) \end{aligned} \quad (11.23)$$

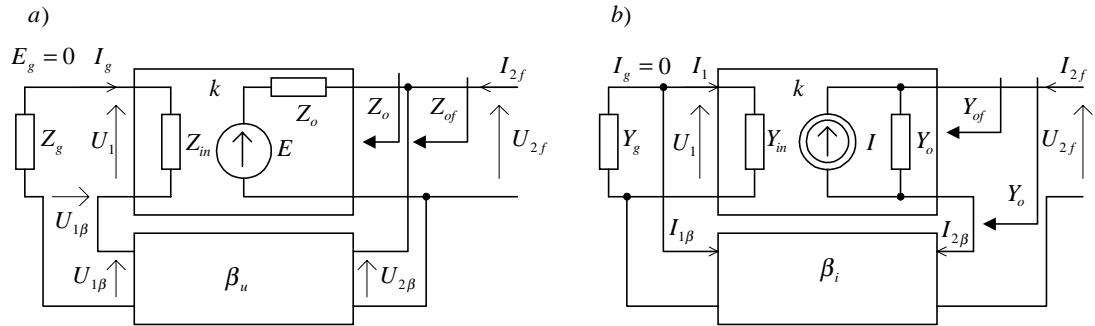
Zatem ujemne sprzężenie równoległe zwiększa admitancję wejściową wzmacniacza.

11.3.4. Wpływ ujemnego sprzężenia zwrotnego na impedancję wyjściową wzmacniacza.

Wpływ ujemnego sprzężenia zwrotnego na impedancję wyjściową zależy również od rodzaju zastosowanego sprzężenia.

Na rys.11.6a przedstawiono obwód do wyznaczania impedancji

wyjściowej układu ze sprzężeniem zwrotnym napięciowym - szeregowym.



Rys.11.6. Obwody do wyznaczania: impedancji (a) i admitancji (b) wyjściowej

Blok wzmacniacza k od strony wyjścia reprezentuje, zgodnie z zasadą Thevenina, sterowane źródło napięciowe E o impedancji wewnętrznej Z_o , przy czym

$$E = k_{u0} U_1 \quad (11.24)$$

gdzie: k_{u0} - wzmacnienie napięciowe przy rozwartym wyjściu ($Z_L = \infty$).

$$I_{2f} = \frac{U_{2f} - E}{Z_o} = \frac{U_{2f} - k_{u0} U_1}{Z_o} \quad (11.25)$$

Impedancję wyjściową wyznaczymy przy $E_g = 0$, zatem

$$U_1 = -U_{1\beta} \frac{Z_{in}}{Z_g + Z_{in}} = -\beta_u U_{2f} \frac{Z_{in}}{Z_g + Z_{in}} \quad (11.26)$$

Podstawiając (11.26) do (11.25) otrzymujemy

$$Z_{of} = -\frac{U_{2f}}{I_{2f}} = \frac{Z_o}{1 + \beta_u k_{us0}} \quad (11.27)$$

gdzie: $k_{us0} = k_{u0} \frac{Z_{in}}{Z_g + Z_{in}}$ jest skutecznym wzmacnieniem napięciowym

wzmacniacza bez sprzężenia zwrotnego.

Jak wynika z zależności (11.27), ujemne sprzężenie zwrotne napięciowe (rys.11.2a i b) zmniejsza impedancję wyjściową wzmacniacza. Przeciwdziała ono zmianom napięcia wyjściowego czyli nadaje układowi cechy źródła napięciowego (działa stabilizująco na poziom napięcia wyjściowego).

Na rys.11.6b przedstawiono obwód do wyznaczania admitancji wyjściowej wzmacniacza z ujemnym sprzężeniem zwrotnym prądowym równoległym. Stanowi on układ dualny do układu z rys 11.6a.

Wzmacniacz od strony wyjścia reprezentuje, zgodnie z zasadą Nortona, sterowane źródło prądowe I o admitancji wewnętrznej Y_o , przy czym

$$I = k_{iz} I_1 \quad (11.28)$$

gdzie: k_{iz} - wzmacnienie prądowe przy zwartym wyjściu ($Z_L = 0$).

Stosując podobne rozważania jak dla sprzężenia napięciowego otrzymujemy wyrażenie określające admitancję wyjściową Y_{of} wzmacniacza z USZ prądowym

$$Y_{of} = \frac{Y_o}{1 + \beta_i k_{isz}} = \frac{1}{Z_{of}} \quad (11.29)$$

gdzie $k_{isz} = k_{is} \frac{Y_{in}}{Y_g + Y_{in}}$ jest skutecznym wzmacnieniem prądowym bez

sprzężenia zwrotnego.

Na podstawie zależności (11.29) możemy stwierdzić, że ujemne sprzężenie zwrotne prądowe (rys.11.2c i d) zwiększa impedancję wyjściową wzmacniacza. Sprzężenie to przeciwdziała zmianom prądu wyjściowego, czyli nadaje układowi cechy źródła prądowego (działa stabilizująco na poziom prądu wyjściowego).

11.4. WPŁYW UJEMNEGO SPRZĘŻENIA ZWROTNEGO NA CHARAKTERYSTYKI CZĘSTOTLIWOŚCIOWE WZMACNIACZY

Zgodnie z zależnością (11.5) charakterystyki częstotliwościowe układu ze sprzężeniem zwrotnym mogą być kształtowane przez odpowiedni dobór wielkości i zależności częstotliwościowych $k(j\omega)$ i $\beta(j\omega)$.

Rozpatrzmy pojedynczy stopień wzmacniacza o transmitancji

$$k(j\omega) = - \frac{k_0}{\left(1 + \frac{\omega_d}{j\omega}\right) \left(1 + \frac{j\omega}{\omega_g}\right)} \quad (11.30)$$

objęty pętlą rzeczywistego sprzężenia zwrotnego o transmitancji

$$\beta = -\beta_0 \quad (11.31)$$

gdzie ω_d , ω_g odpowiednio dolna i górna częstotliwość graniczna wzmacniacza.

Dla dużych częstotliwości, gdy $\omega \gg \omega_d$

$$k_w(j\omega) \approx -\frac{k_0}{1 + \frac{j\omega}{\omega_g}} \quad (11.32)$$

Na podstawie zależności (11.5, 11.31, 11.32) możemy wyznaczyć wzmacnienie wzmacniacza z ujemnym sprzężeniem zwrotnym dla dużych częstotliwości

$$k_{wf}(j\omega) = \frac{-\frac{k_0}{1 + \frac{j\omega}{\omega_g}}}{1 + \frac{\beta_0 k_0}{1 + \frac{j\omega}{\omega_g}}} = -\frac{k_0}{1 + \beta_0 k_0} \frac{1}{1 + \frac{j\omega}{\omega_g(1 + \beta_0 k_0)}} \quad (11.33)$$

Transmitancja $k_{wf}(j\omega)$ ma również postać jednobiegunowej funkcji dolnoprzepustowej

$$k_{wf}(j\omega) = \frac{-k_{0f}}{1 + \frac{j\omega}{\omega_{gf}}} \quad (11.34)$$

przy czym

$$k_{0f} = \frac{k_0}{1 + \beta_0 k_0} \quad (11.35)$$

$$\omega_{gf} = \omega_g(1 + \beta_0 k_0) = \omega_g \frac{k_0}{k_{0f}} \quad (11.36)$$

Ujemne sprzężenia zwrotne powoduje zwiększenie górnej częstotliwości granicznej tyle razy, ile razy zmniejsza się wzmacnienie w zakresie średnich częstotliwości.

Iloczyn modułu wzmacnienia dla średnich częstotliwości i górnej częstotliwości granicznej nazywamy *polem wzmacnienia GB* (ang. *gain-bandwidth product*) jest stały

$$GB = k_0 \omega_g = k_{0f} \omega_{gf} = const \quad (11.37)$$

Jak widać, skutek zastosowania ujemnego sprzężenia zwrotnego nastąpiła „wymiana” wzmacnienia i pasma, przy czym pole wzmacnienia i kształt charakterystyki pozostały bez zmian.

Podobnie dla małych częstotliwości, gdy $\omega \ll \omega_d$

$$k_n(j\omega) = -\frac{k_0}{1 + \frac{\omega_d}{j\omega}} \quad (11.38)$$

Z zależności (11.5, 11.31, 11.38) otrzymujemy

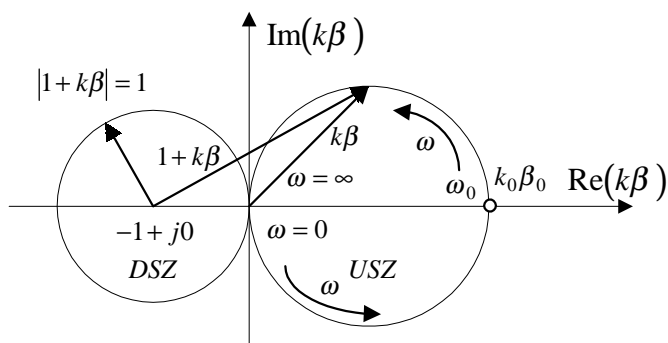
$$k_{nf}(j\omega) = -\frac{k_{0f}}{1 + \frac{\omega_{df}}{j\omega}} \quad (11.39)$$

przy czym

$$\omega_{df} = \frac{\omega_d}{1 + \beta_0 k_0} = \frac{k_{0f}}{k_0} \omega_d \quad (11.40)$$

Pasmo wzmacniacza od strony małych częstotliwości rozszerza się proporcjonalnie do redukcji wzmocnienia.

Na rys.11.7 przedstawiono wykres biegunowy wzmocnienia pętli $k\beta$ i współczynnika sprzężenia $1+k\beta$ w funkcji częstotliwości dla rozpatrywanego przypadku.



Rys.11.7. Wykres biegunowy wzmocnienia pętli wzmacniacza pasmowo przepustowego z rzeczywistym USZ

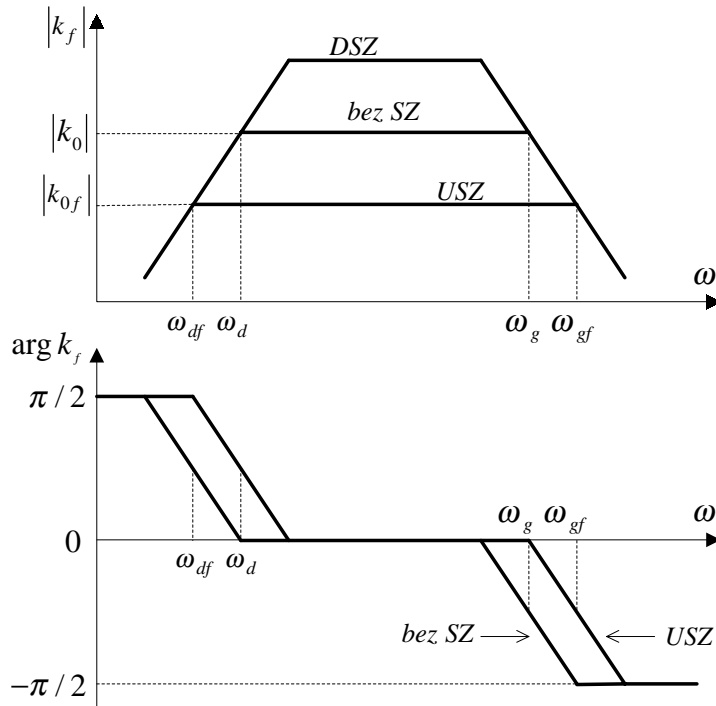
Koło o promieniu jednostkowym $|1+k\beta|=1$ reprezentuje miejsce geometryczne końców wektorów odpowiadających stałemu modułowi $|k_f/k|=1$. Obszar wewnątrz tego koła odpowiada dodatniemu, zaś na zewnątrz - ujemnemu sprzężeniu zwrotnemu. Wykres biegunowy $k\beta$ pokrywa się w tym przypadku z wykresem biegunowym funkcji k w odpowiedniej skali i jest kołem leżącym w całości po prawej stronie osi rzędnych $\text{Im}(k\beta)$.

Wykres ten nie przecina koła jednostkowego $|1+k\beta|=1$, zatem sprzężenie zwrotne jest ujemne w całym zakresie częstotliwości $0 \rightarrow \infty$.

Na rys.11.8 przedstawiono aproksymowane, częstotliwościowe charakterystyki Bodego układu bez i ze sprzężeniem zwrotnym dla rozpatrywanego przypadku.

Jak widać z rys.11.8, charakterystyka wzmocnienia układu z ujemnym sprzężeniem zwrotnym leży całkowicie „wewnątrz” charakterystyki układu bez sprzężenia.

Należy również podkreślić, że przy dodatnim sprzężeniu zwrotnym kosztem wzrostu wzmocnienia w zakresie średnich częstotliwości następuje zawężenie pasma wzmacniacza.



Rys.11.8. Częstotliwościowe charakterystyki Bodego układu bez i ze sprzężeniem zwrotnym.

Tytułem przykładu możliwości kształtowania charakterystyk częstotliwościowych za pomocą ujemnego sprzężenia zwrotnego rozpatrzmy przypadek 2-stopniowego wzmacniacza o dolnoprzepustowej transmitancji 2-go rzędu

$$k = \frac{k_0}{\left(1 + j \frac{\omega}{\omega_1}\right) \left(1 + j \frac{\omega}{\omega_2}\right)} \quad (11.41)$$

objętego pętlą sprzężenia zwrotnego

$$\beta = \beta_0 \quad (11.42)$$

Transmitancję wzmacniacza z USZ określa zależność

$$k_f(j\omega) = \frac{k_{0f}}{1 + \frac{j\omega}{1 + \beta_0 k_0} \left(\frac{1}{\omega_1} + \frac{1}{\omega_2} \right) + \frac{(j\omega)^2}{\omega_1 \omega_2 (1 + \beta_0 k_0)}} \quad (11.43)$$

Transmitancję $k_f(j\omega)$ 2-go rzędu najczęściej zapisujemy w postaci

znormalizowanej

$$k_f(j\omega) = \frac{k_{f0}}{1 + \frac{j\omega}{Q\omega_0} + \frac{(j\omega)^2}{\omega_0^2}} \quad (11.44)$$

o parametrach

$$\omega_0^2 = \omega_1\omega_2(1 + \beta_0k_0), \quad Q = \frac{\omega_0}{\omega_1 + \omega_2} \quad (11.45)$$

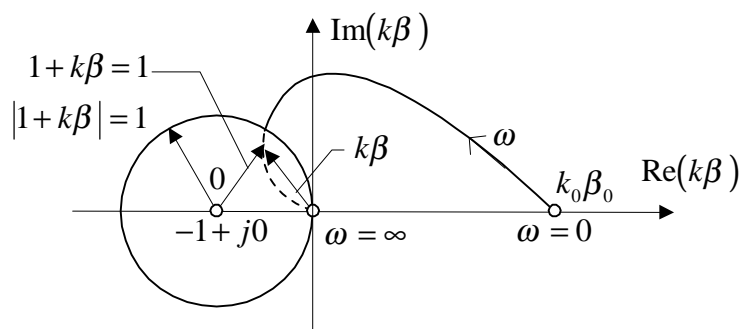
Bieguny transmitancji (11.44) określone są wzorem

$$p_{1,2} = -\frac{\omega_0}{2Q} \pm \frac{\omega_0}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{Q^2} - 4\right)} \quad (11.46)$$

Ujemne sprzężenie zwrotne pozwala na kontrolowaną zmianę położenia biegunów funkcji wzmocnienia, tzn. kształtu charakterystyk częstotliwościowych układu. Chociaż bieguny funkcji $k(j\omega)$ (wzór 11.41) są rzeczywiste, to bieguny funkcji $k_f(j\omega)$ (wzór 11.44) mogą być zespolone, sprzężone. Bieguny stają się zespolone przy dostatecznie silnym sprzężeniu, gdy jest spełniony warunek

$$Q > 0,5 \text{ czyli } 1 + \beta_0k_0 > \frac{(\omega_1 + \omega_2)^2}{4\omega_1\omega_2} \quad (11.47)$$

Na rys.11.9 przedstawiono szkicowo wykres biegunowy wzmocnienia pętli $k\beta$ i współczynnika sprzężenia $1 + k\beta$ w funkcji częstotliwości dla rozpatrywanego przypadku.

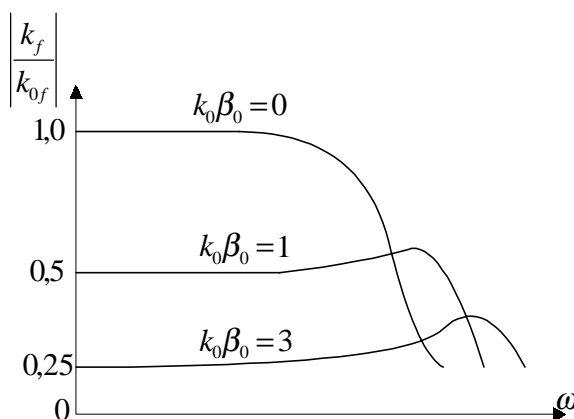


Rys.11.9. Wykres biegunowy wzmocnienia pętli $k\beta$ układu 2-biegunowego

Ponieważ wykres biegunowy wzmocnienia pętli $k\beta$ przecina koło jednostkowe $|1 + k\beta| = 1$ (gdy $\omega \rightarrow \infty$, to przesunięcie fazy funkcji $k\beta$ wynosi 180°), zatem w zakresie częstotliwości przedstawionym na rys.11.9 (linia przerywana) sprzężenie zwrotne jest dodatnie. W tym

zakresie $|k_f| > |k|$, zaś charakterystyka częstotliwościowa może nawet wykazywać maksimum.

Na rys.11.10 przedstawiono przykładowe charakterystyki amplitudowe wzmacniacza z 2-biegunową funkcją wzmocnienia dla różnych wartości stosunku zwrotnego.



Rys.11.10. Wpływ ujemnego sprzężenia zwrotnego na charakterystyki wzmacniacza 2-biegunowego

11.5. STABILNOŚĆ UKŁADÓW ZE SPRZĘŻENIEM ZWROTNYM

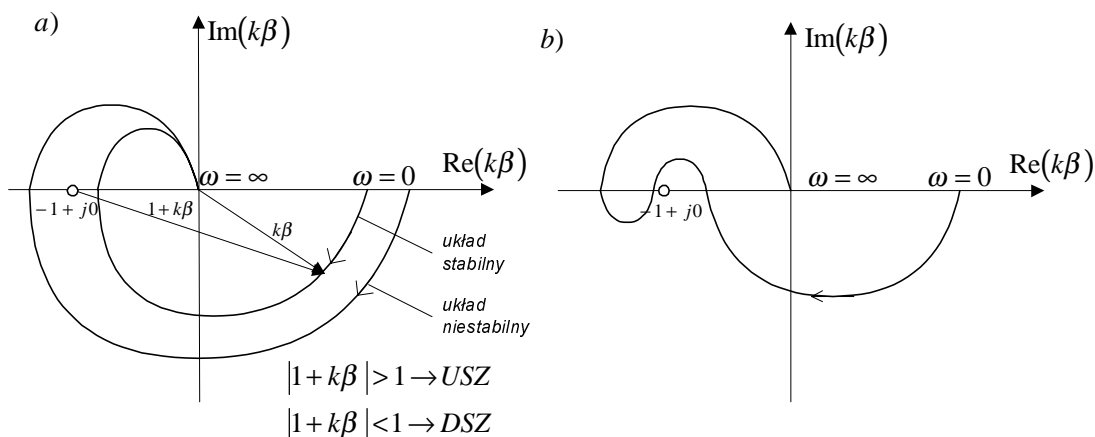
Zgodnie z zależnością (11.5) w zakresie częstotliwości, w którym $|1 + k\beta| < 1$ sprzężenie zwrotne staje się dodatnie, zaś $k\beta = -1$ układ staje się niestabilny. Niebezpieczeństwo niestabilności występuje w układach, w których graniczna wartość przesunięcia fazy w pętli sprzężenia zwrotnego jest większa od 180° , zaś stosunek zwrotny jest dostatecznie duży. Dla dokonania analizy warunku stabilności można zastosować wiele kryteriów analitycznych bądź graficznych.

Nie wdając się w głębsze rozważania nad tymi metodami przypomnimy kryteria graficzne Nyquista i Bodego, oparte na analizie zespolonej wielkości wzmocnienia pętli sprzężenia zwrotnego (stosunku zwrotnego) $T(j\omega) = k\beta$

a) kryterium Nyquista

Układ ze sprzężeniem zwrotnym jest bezwzględnie stabilny, jeśli przy zmianie częstotliwości od 0 do ∞ promień $k\beta$ ani razu nie okrąży punktu $-1 + j0$. W przeciwnym przypadku układ jest niestabilny.

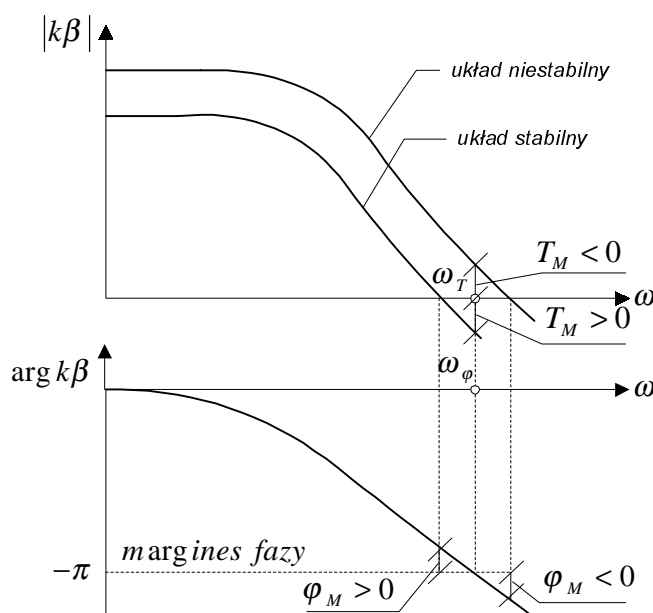
Układ warunkowo stabilny spełnia w danym przypadku warunek stabilności Nyquista, ale nie może być uznany za stabilny, gdyż jeśli stosunek zwrotny $k\beta$ zmaleje, np. wskutek zmniejszenia wzmocnienia, to może stać się niestabilny.



Rys.11.11. Wykres Nyquista: a) układu stabilnego i niestabilnego, b) układu warunkowo stabilnego

b) kryterium Bodego

Warunek stabilności można sprawdzić korzystając z charakterystyk częstotliwościowych wzmocnienia otwartej pętli $T(j\omega) = k\beta$. W tym celu należy sprawdzić, czy dla pulsacji $\omega = \omega_\phi$, przy której $\arg T(j\omega_\phi) = -\pi$ moduł $|T(j\omega_\phi)|$ jest większy (układ niestabilny), czy też mniejszy (układ stabilny) od jedności (0 dB) (rys.11.12).



Rys.11.12. Określenie marginesów stabilności dla charakterystyk częstotliwościowych układu

Sprawdzenie stabilności może być również dokonane przez stwierdzenie, czy dla pulsacji $\omega = \omega_T$, przy której $|T(j\omega_T)| = 1$ (0dB), wartość fazy $|\arg T(j\omega_T)| < \pi$ (układ stabilny), czy też $|\arg T(j\omega_T)| > \pi$

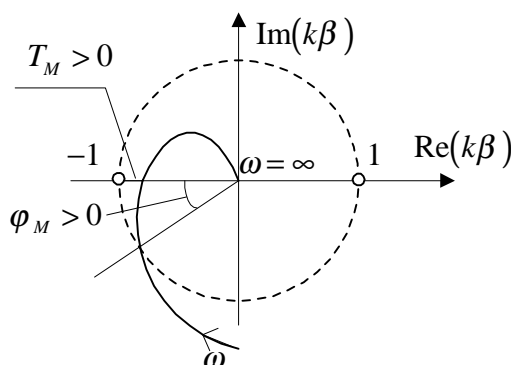
(układ niestabilny) (rys.11.12).

Miarą stabilności mogą być marginesy stabilności modułu T_M i φ_M . Margines wzmocnienia T_M określa w mierze decybelowej wielkość dodatkowego wzmocnienia jakie jest potrzebne przy $\omega = \omega_\varphi$ (wtedy $\arg T(j\omega_\varphi) = -\pi$) do utraty stabilności. Podobnie margines fazy φ_M określa przy $\omega = \omega_T$ (wtedy $|T(j\omega_T)| = 1$) wielkość dodatkowego przesunięcia fazowego potrzebnego do utraty stabilności przez układ (rys.11.12)

$$\begin{aligned} T_M [dB] &= -20 \log |T(j\omega_\varphi)| \\ \varphi_M &= \pi + \arg T(j\omega_T) \end{aligned} \quad (11.48)$$

W układzie stabilnym $T_M > 0$ i $\varphi_M > 0$.

Na rys.11.13 określono marginesy stabilności na wykresie Nyquista.



Rys.11.13. Określenie marginesów stabilności na wykresie Nyquista

Praktycznie układ wzmacniacza o dobrej stabilności wymaga następujących marginesów:

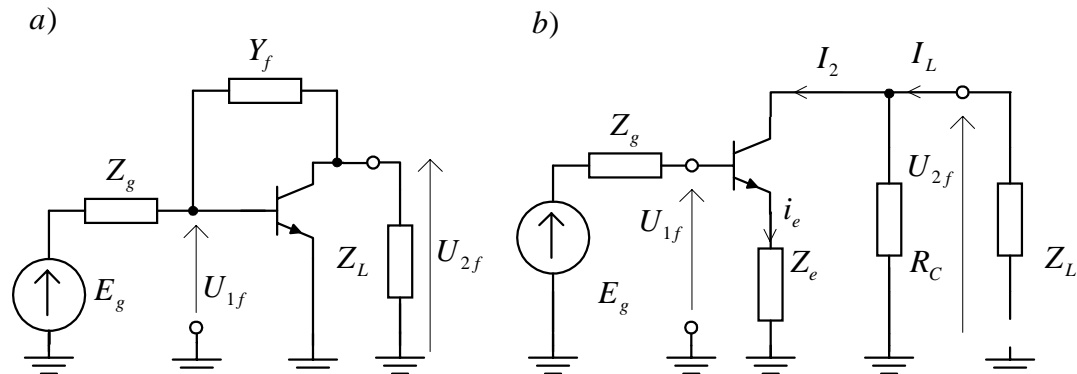
$$\begin{aligned} T_M &= 2 - 3 \text{ dB} \quad i \quad \varphi_M = 10^\circ - 30^\circ && \text{na każdy stopień wzmacniacza,} \\ T_M &\approx 10 \text{ dB} \quad i \quad \varphi_M \approx 50^\circ && \text{dla całego wzmacniacza.} \end{aligned}$$

11.6. PRZYKŁADY WZMACNIACZY Z UJEMNYM SPRZĘŻENIEM ZWROTNYM

Praktyczna realizacja podstawowych rodzajów ujemnego sprzężenia zwrotnego zostanie przedstawiona na przykładzie jednostopniowych i wielostopniowych wzmacniaczy z tranzystorami bipolarnymi, przy wykorzystaniu uproszczonych schematów ideowych (tylko dla składowej zmiennej) tych wzmacniaczy.

Na rys.11.14 przedstawiono przykłady realizacji ujemnego sprzężenia zwrotnego we wzmacniaczach jednostopniowych:

1. USZ napięciowe - równoległe (rys.11.14a),
2. USZ prądowy - równoległe, nazywane sprzężeniem emiterowym (rys.11.14b)



Rys.11.14. Wzmacniacze w konfiguracji OE z USZ:

a) napięciowym - równoległym, b) prądowym - szeregowym

Transmitancje obwodów sprzężenia zwrotnego wyrażają się wzorami:

- w układzie z USZ napięciowym - równoległym (rys.11.14a)

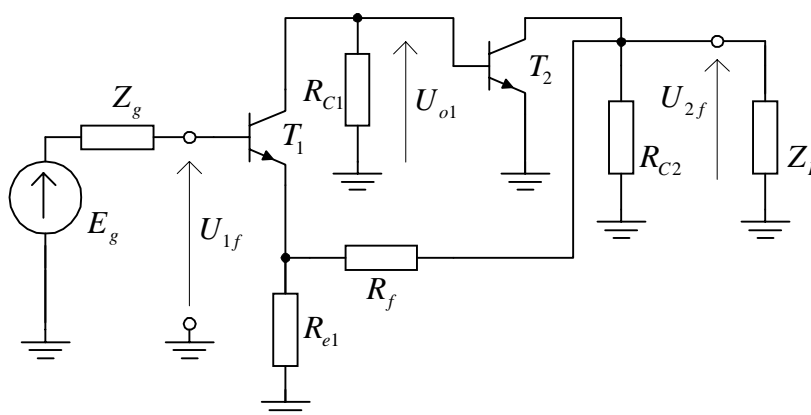
$$\beta_{iu} = -Y_f \quad \beta_u = -Y_f Z_g \quad \beta_i = Y_f Z_L \quad (11.49)$$

- w układzie z USZ prądowym - szeregowym (rys.11.14b)

$$\beta_{ui} = -Z_e \quad \beta_u = -\frac{Z_e}{Z_{Lt}} \quad \beta_i = -\frac{Z_e}{Z_g} \quad (11.50)$$

przy czym $Z_{Lt} = R_C \parallel Z_L$, a transmitancje tego układu są obliczane w stosunku do prądu I_2 .

Na rys.11.15 przedstawiono uproszczony schemat ideowy dla składowej zmiennej dwustopniowego wzmacniacza z USZ napięciowym - szeregowym.



Rys.11.15. Wzmacniacz w konfiguracji OE z USZ napięciowym - szeregowym

W układzie tym występuje podwójna pętla sprzężenia zwrotnego:

lokalnego emiterowego - rezystancja R_{e1} (o transmitancji zwrotnej β_{u1}) oraz dwustopniowego - rezystancje R_{e1}, R_f (o transmitancji zwrotnej β_u). Ponieważ wzmacniacz dwustopniowy nie odwraca fazy sygnału (napięcia U_{1f} i U_{2f} są w fazie), dlatego dla realizacji dwustopniowego USZ sygnał z wyjścia jest podawany przez rezystor R_f na emiter tranzystora T_1 .

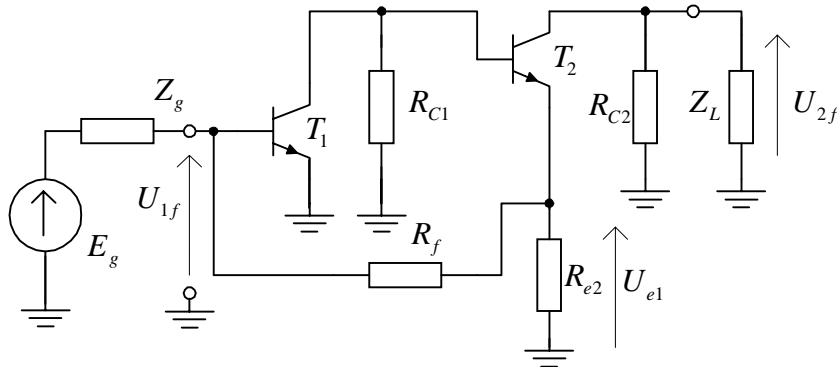
Napięciowe transmitancje zwrotne w układzie wynoszą

$$\beta_{u1} = \frac{U_{e1}}{U_{o1}} \cong \frac{R_{e1}}{R_{Lt1}}; \quad \beta_u = \frac{U_{e1}}{U_{2f}} = \frac{R_{e1}}{R_{e1} + R_f} \quad (11.51)$$

przy czym: $R_{Lt1} = R_{C1} \parallel R_{inT2}$.

Na rys.11.16 przedstawiono schemat ideowy dwustopniowego wzmacniacza z USZ prądowym - równoległym.

W układzie tym również występuje podwójna pętla USZ: lokalnego emiterowego - rezystancja R_{e2} (o transmitancji zwrotnej β_{u2}) oraz dwustopniowego - rezystancje R_{e2}, R_f (o transmitancji zwrotnej β_u).



Rys.11.16. Wzmacniacz dwustopniowy z USZ prądowym - równoległym

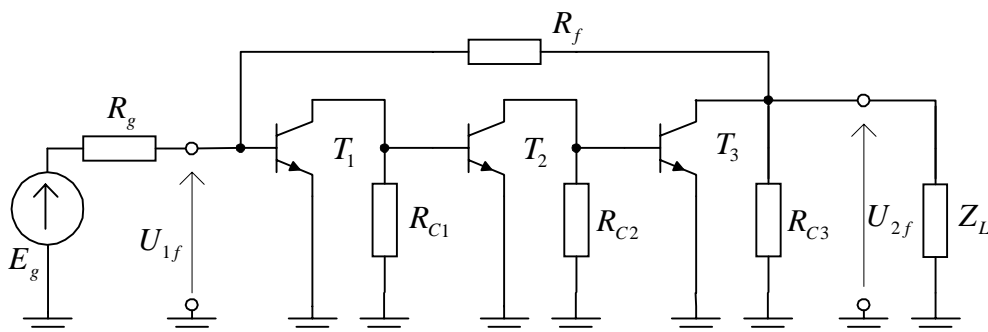
Transmitancje zwrotne w układzie wynoszą

$$\beta_{u2} = -\frac{R_{e2}}{Z_{Lt2}}, \quad \text{gdzie } Z_{Lt2} = R_{C2} \parallel Z_L \quad (11.52)$$

$$\beta_u = \frac{R_{e2}}{R_{e2} + R_f} \frac{Z_g}{Z_{Lt2}}, \quad \beta_i = \frac{R_{e2}}{R_{e2} + R_f} \quad (11.53)$$

Na rys.11.17 przedstawiono schemat ideowy trzystopniowego wzmacniacza z USZ napięciowym - równoległym. Układ trzystopniowy odznacza się dużym wzmocnieniem otwartej pętli oraz większym przesunięciem fazy na krańcach pasma, tzn. zwiększonym

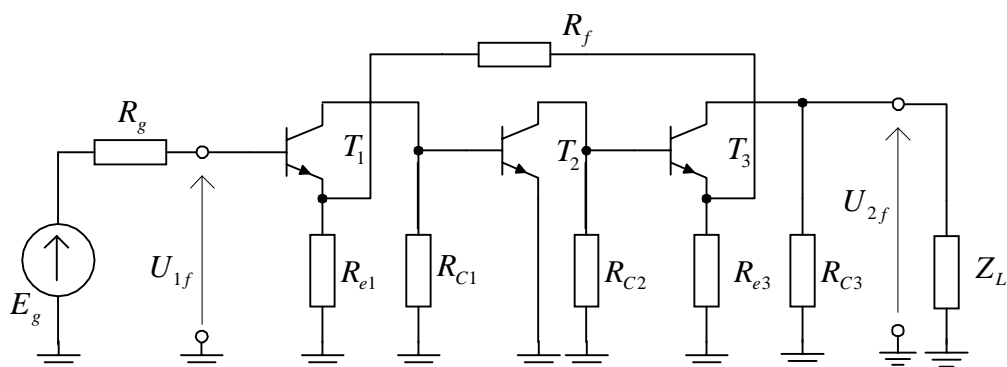
niebezpieczeństwem niestabilności.



Rys.11.17. Tranzystorowy wzmacniacz z USZ napięciowym - równoległym

Zwiększone wzmocnienie otwartej pętli umożliwia zastosowanie małej wartości współczynnika sprzężenia zwrotnego β , przez co obciążający wpływ obwodów sprzężenia jest mały.

Na rys.11.18 przedstawiono schemat ideowy dla składowej zmiennej trzystopniowego wzmacniacza z USZ prądowym - szeregowym.



Rys.11.18. Tranzystorowy wzmacniacz z USZ prądowym - szeregowym