

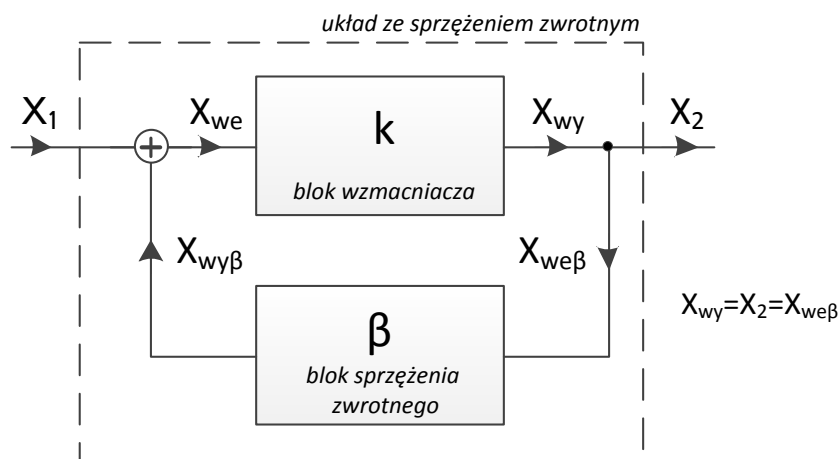
10. SPRZĘŻENIE ZWROTNE

Przypomnienie pojęcia transmitancji.

Transmitancja układu jest to iloraz jego odpowiedzi i wymuszenia. W układach elektronicznych wymuszenia i odpowiedzi są zwykle prądami lub napięciami odpowiednio wejściowymi i wyjściowymi. Dlatego transmitancja wiąże ze sobą w postaci ilorazu prąd lub napięcie wyjściowe (odpowiedź) z prądem lub napięciem wejściowym (wymuszeniem). Jeżeli transmitancja jest ilorazem napięcia wyjściowego wzmacniacza i jego napięcia wejściowego określa się ją jako transmitancję napięciową i jest ona zarazem wzmocnieniem napięciowym. Natomiast iloraz prądu wyjściowego i prądu wejściowego stanowi transmitancję prądową, która odpowiada wzmocnieniu prądowemu. W pozostałych przypadkach mamy do czynienia z transmitancją napięciowo - prądową lub z transmitancją prądowo - napięciową. Będzie o tym mowa w dalszym tekście.

10.1. ELEMENTARNA TEORIA SPRZĘŻENIA ZWROTNEGO

Sprzężenie zwrotne (feedback) jest to podanie części sygnału wyjściowego wzmacniacza z powrotem na jego wejście. Ta część sygnału przekazywana na wejście wzmacniacza sumuje się z sygnałem wejściowym układu modyfikując warunki sterowania.



Rys.10.1. Układ ze sprzężeniem zwrotnym

Schemat blokowy układu ze sprzężeniem zwrotnym przedstawiono na rysunku 10.1. Wydzielono tam dwie części: blok wzmacniania - przenoszącego sygnał od wejścia do wyjścia i blok sprzężenia zwrotnego - dostarczającego część sygnału wyjściowego wzmacniacza z powrotem do jego wejścia. Dzieje się to w węzle sumacyjnym oznaczonym symbolem *plus*.

Transmitancję wzmacniacza oznaczono literą k , a transmitancję bloku sprzężenia zwrotnego literą β . Ponadto: X_1 - sygnał wejściowy układu, X_{we} - sygnał wejściowy bloku wzmacniacza, $X_{we\beta}$ - sygnał wejściowy bloku sprzężenia zwrotnego, $X_{wy\beta}$ - sygnał wyjściowy bloku sprzężenia (sygnał zwrotny), X_{wy} - sygnał wyjściowy bloku wzmacniacza, X_2 - sygnał wyjściowy układu, przy czym jak podano na rys. 10.1 mamy:

$$X_{wy} = X_2 = X_{we\beta} \quad (10.1)$$

Transmitancje wiążą ze sobą w postaci ilorazu sygnały (prądy lub napięcia) wyjściowe i wejściowe:

$$k = \frac{X_{wy}}{X_{we}} \quad \beta = \frac{X_{wy\beta}}{X_{we\beta}} \quad (10.2)$$

Iloczyn transmitancji bloku wzmacniacza i bloku sprzężenia zwrotnego $k\beta$ nazywany jest *wzmocnieniem pętli sprzężenia zwrotnego*. Wzmocnienie pętli sprzężenia zwrotnego po uwzględnieniu (10.1) i (10.2) można określić ogólną zależnością:

$$k\beta = \frac{X_{wy\beta}}{X_{we}} \quad (10.3)$$

Sygnał zwrotny $X_{wy\beta}$ jest proporcjonalny do prądu lub napięcia wyjściowego wzmacniacza i sumuje się z sygnałem wejściowym układu X_1 tworząc sygnał wejściowy wzmacniacza X_{we} .

$$X_{we} = X_1 + X_{wy\beta} \quad (10.4)$$

Transmitancja k_f całego układu ze sprzężeniem zwrotnym (a więc obejmująca łącznie blok wzmacniacza i blok sprzężenia zwrotnego zaznaczony na rys 10.1 linią przerywaną) widziana od wejścia (sygnał X_1) do wyjścia (sygnał X_2) określona jest:

$$k_f = \frac{X_2}{X_1} \quad (10.5)$$

Po przekształceniu uwzględniając (10.1), (10.2), (10.3) i (10.4) otrzymujemy:

$$k_f = \frac{X_2}{X_1} = \frac{X_2}{X_{we} - X_{wy\beta}} = \frac{X_2}{X_{we} \left(1 - \frac{X_{wy\beta}}{X_{we}}\right)} = \frac{k}{1 - k\beta} \quad (10.6)$$

Otrzymano w ten sposób końcową zależność:

$$k_f = \frac{k}{1 - k\beta} \quad (10.7)$$

Jest to podstawowy wzór elementarnej teorii sprzężenia zwrotnego. Opisowo zapis (10.7) można wyrazić stwierdzeniem: transmitancja układu ze sprzężeniem zwrotnym k_f jest równa transmitancji samego wzmacniacza k podzielonej przez jedność minus iloczyn transmitancji wzmacniacza i transmitancji bloku sprzężenia zwrotnego $k\beta$.

Na rys.10.1 nie sprecyzowano dokładnie sposobu połączenia bloków k i β na wejściu i wyjściu. Mimo to wzór (10.7) pozostaje słuszny przy spełnieniu jednak jednego warunku, że bloki te nie obciążają się wzajemnie, tj. gdy fakt ich wzajemnego połączenia nie wpływa na wartość k i β .

Sprzężenie zwrotne można dzielić się na dwa rodzaje: ujemne i dodatnie. Łatwiejsza interpretacja rodzajów sprzężeń zwrotnych jest wtedy, gdy transmitancja stanowi wzmocnienie. Wtedy to można stwierdzić:

1. *Ujemne sprzężenie zwrotne* ma miejsce wtedy, gdy wzmocnienie układu maleje po zastosowaniu sprzężenia, tj. gdy $|k_f| < |k|$. Wówczas to mianownik ułamka z równania (10.7) jest większy od jednośc $|1 - k\beta| > 1$. Wyrażenie $1 - \beta k$ zwane jest też współczynnikiem sprzężenia zwrotnego. Można zatem stwierdzić, że sprzężenie ujemne występuje wtedy, gdy współczynnik sprzężenia zwrotnego jest większy od jednośc.

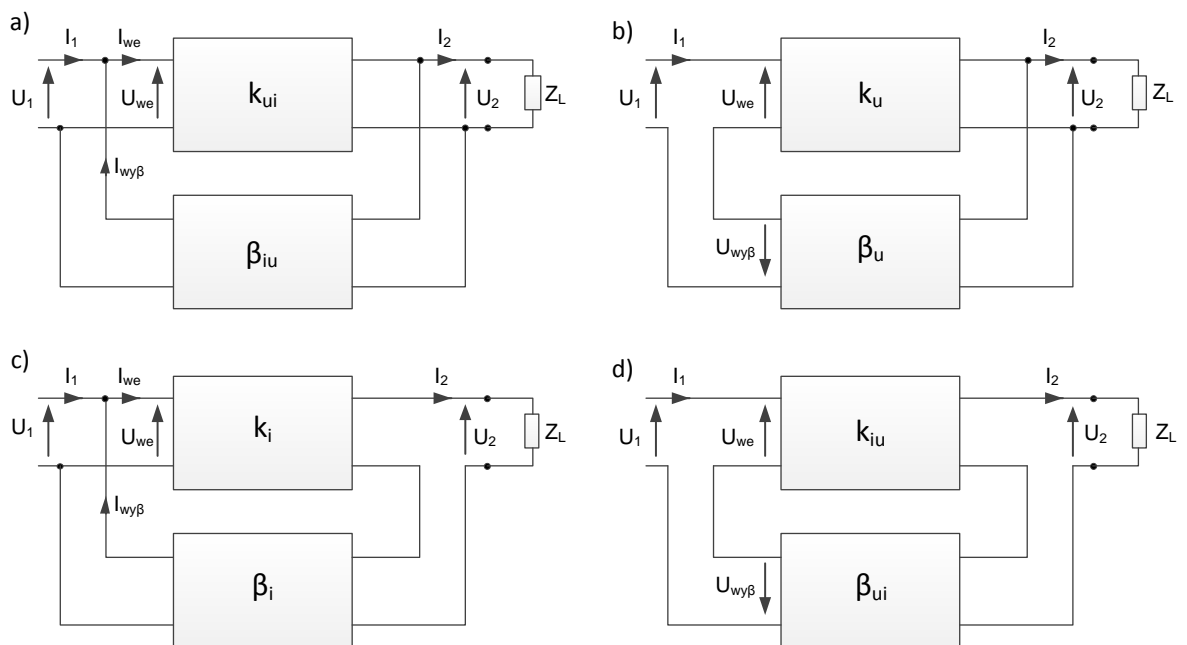
2. *Dodatnie sprzężenie zwrotne* ma miejsce wtedy, gdy wzmocnienie układu rośnie po zastosowaniu sprzężenia zwrotnego, tj. gdy $|k_f| > |k|$. Sprzężenie zwrotne dodatnie występuje zatem wtedy, gdy współczynnik sprzężenia zwrotnego jest mniejszy od jedności $|1 - k\beta| < 1$.

Powyżej zdefiniowane rodzaje sprzężeń zwrotnych określane są jak widać względem modułu transmitancji wzmacniacza i transmitancji sprzężenia zwrotnego oraz modułu współczynnika sprzężenia zwrotnego. W ogólności bowiem transmitancje są wyrażane liczbami zespolonymi i wtedy $k\beta = |k\beta| \exp(j\varphi)$, gdzie φ jest to przesunięcie fazowe sygnału. Tego zapisu nie trzeba stosować, gdy zakładamy, że rozpatrujemy zakres średnich częstotliwości sygnału, gdzie przesunięcia fazy są nieznaczące.

Jeżeli współczynnik sprzężenia zwrotnego jest rzeczywisty, to wtedy sprzężenie zwrotne jest czysto ujemne lub czysto dodatnie. Oznacza to, że dla sprzężenia zwrotnego ujemnego sygnał zwrotny $X_{wy\beta}$ jest w przeciwfazie z sygnałem wejściowym X_1 i oba sygnały się odejmują, a dla sprzężenia zwrotnego dodatniego sygnał zwrotny $X_{wy\beta}$ jest w fazie z sygnałem wejściowym X_1 i oba sygnały się dodają.

Ze względu na sposób połączenia bloków (czwórników) k i β na ich wejściach i wyjściach, rozróżnia się cztery typy sprzężenia zwrotnego. Każdy z tych typów ma inny układy połączeń (rys.10.2). W układach tych występuje:

1. sprzężenie zwrotne napięciowe - równoległe,
2. sprzężenie zwrotne napięciowe - szeregowe,
3. sprzężenie zwrotne prądowe - równoległe,
4. sprzężenie zwrotne prądowe -szeregowe.



Rys.10.2. Podstawowe układy (typy) sprzężenia zwrotnego; a) sprzężenie napięciowe - równoległe, b) sprzężenie napięciowe - szeregowe, c) sprzężenie prądowe - równoległe, d) sprzężenie prądowe - szeregowe; Z_L - obciążenie

Sposób w jaki nazwano te układy pochodzi od sposobu połączenia na wyjściu (pierwszy człon nazwy) i wejściu (drugi człon nazwy). Tak więc w połączeniu napięciowym bloku k na wyjściu (rys.10.2a i b) sygnał zwrotny zależy od napięcia wyjściowego wzmacniacza U_2 zatem pierwszy człon nazwy brzmi: sprzężenie napięciowe. W przypadku połączenia prądowego na wyjściu bloku k (rys.10.2c i d) sygnał zwrotny zależny jest od prądu wyjściowego I_2 , zatem nazwano to sprzężeniem prądowym.

Zależnie od sposobu połączenia w obwodzie wejściowym wyróżnia się sprzężenie szeregowo i równoległe. Sprzężenie jest szeregowo, gdy blok k i β połączone są szeregowo na wejściu (rys.10.2b i d), a równoległe, gdy połączenie wejść jest równoległe (rys.10.2a i c).

Dla różnych układów sprzężenia transmitancje k i β mają różną postać, stosownie do tego, jakie sygnały są rozważane na wejściu i wyjściu układu. I tak:

dla sprzężenia napięciowego-równoległego (rys.10.2a):

$$k = \frac{U_2}{I_{we}} = k_{ui} \quad \beta = \frac{I_{wy\beta}}{U_2} = \beta_{iu} \quad (10.8)$$

dla sprzężenia napięciowego-szeregowego (rys.10.2b):

$$k = \frac{U_2}{U_{we}} = k_u \quad \beta = \frac{U_{wy\beta}}{U_2} = \beta_u \quad (10.9)$$

dla sprzężenia prądowego-równoległego (rys.10.2c):

$$k = \frac{I_2}{I_{we}} = k_i \quad \beta = \frac{I_{wy\beta}}{I_2} = \beta_i \quad (10.10)$$

dla sprzężenia prądowego-szeregowego (rys.10.2d):

$$k = \frac{I_2}{U_{we}} = k_{iu} \quad \beta = \frac{U_{wy\beta}}{I_2} = \beta_{ui} \quad (10.11)$$

Podstawowa zależność (10.7) powinna być stosowana tylko do tych transmitancji, które odpowiadają kombinacji sygnałów wejściowych i wyjściowych konkretnego typu sprzężenia. Jeżeli np. sprzężenie jest napięciowe - równoległe, to k i k_f są transmitancjami napięciowo prądowymi k_{ui} i k_{uif} . Nie można natomiast wyciągnąć bezpośrednio żadnych wniosków dotyczących innych transmitancji tego wzmacniacza.

10.2. WPŁYW UJEMNEGO SPRĘŻENIA ZWROTNEGO NA WŁAŚCIWOŚCI WZMACNIACZY

• Jeżeli wzmocnienie pętli sprzężenia zwrotnego jest duże tzn. iloczyn $k \beta$ jest znacznie większy od jedności ($k \beta \gg 1$), wówczas wzór (10.7) można zastąpić przybliżeniem:

$$k_f = \frac{k}{1 - k\beta} = -\frac{1}{\beta} \cdot \frac{1}{1 - \frac{1}{k\beta}} \approx -\frac{1}{\beta} \quad \text{gdy } |k\beta| \gg 1 \quad (10.12)$$

Sytuacja w której $k \beta \gg 1$ charakteryzuje stan układu w którym zastosowano silne sprzężenie zwrotne. Jak widać z (10.12) występuje wtedy uniezależnienie wzmocnienia układu

ze sprzężeniem zwrotnym od wzmocnienia samego bloku (czwórnika) wzmacniacza. Jest to jeden z najważniejszych skutków występowania ujemnych sprzężeń zwrotnych w układach analogowych. Można stwierdzić, że przy silnym sprzężeniu zwrotnym właściwości układu zależą jedynie od właściwości pętli sprzężenia zwrotnego (określanych przez transmitancję β) i nie zależą od właściwości wzmacniacza. Czwórnik β jest zwykle zbudowany z elementów biernych (np. z kondensatorów i rezystorów), a ich stabilność oraz możliwość doboru wymaganych parametrów jest znacznie większa niż dla czwórnika k (wzmacniacza). Dlatego właściwość ta jest bardzo cenna dla praktycznego wykorzystania.

- Polepszenie stałości wzmocnienia w kategoriach ilościowych można ocenić wprowadzając pojęcie wrażliwości. *Wrażliwość (czułość; sensitivity)* w ogólności określa zmianę pewnego parametru układu w reakcji na zmianę innego parametru. Wrażliwość względna zaś określa stosunek względnych zmian pewnego parametru w stosunku do względnych zmian innego parametru.

Wrażliwość względną wzmocnienia wzmacniacza można określić:

$$S = \frac{\frac{\partial k_f}{k}}{\frac{\partial k}{k}} = \frac{k_f}{k} \cdot \frac{\partial k_f}{\partial k} = \frac{k_f}{k} \cdot \frac{1}{(1 - k\beta)^2} = \frac{1}{1 - k\beta} \quad (10.13)$$

Jak widać z zależności (10.13) przy braku sprzężenia zwrotnego ($\beta=0$) wrażliwość S jest równa 1. Wprowadzenie ujemnego sprzężenia zmniejsza wrażliwość układu w takim stopniu w jakim wynosi wzmocnienie pętli sprzężenia zwrotnego $k\beta$. Zmniejszenie wrażliwości oznacza poprawę stałości (stabilności) wzmocnienia wzmacniacza. Jeżeli np. $k\beta \approx -100$ to $S \approx 0,01$ tj. przy jednoprocentowej zmianie wzmocnienia k wzmacniacza (czwórnika k) wzmocnienie układu z pętlą sprzężenia zwrotnego k_f zmienia się o 0,01%. Stabilność wzmocnienia otrzymywaną z wykorzystaniem ujemnego sprzężenia zwrotnego uzyskuje się kosztem redukcji wzmocnienia wzmacniacza. Stabilność ta jest tym większa im większy był nadmiar wzmocnienia w układzie bez sprzężenia.

- Ujemne sprzężenie zwrotne powoduje redukcję zniekształceń nieliniowych polepszając liniowość wzmacniaczy. Jeżeli wzmacniacz jest nieliniowy to w wyniku działania sprzężenia zwrotnego powstaje taki sygnał X_{we} , który w znacznym stopniu kompensuje zniekształcenia.

Powszechnie używanym wskaźnikiem wielkości zniekształceń jest współczynnik zawartości harmonicznych h . Układ nieliniowy, do którego wejścia doprowadzany jest sygnał sinusoidalny o częstotliwości f wytwarza składowe harmoniczne sygnału wejściowego i przekazuje je wraz ze składową podstawową na wyjście. Stosunek wartości skutecznych napięcia (lub prądu) sygnałów o częstotliwościach harmonicznych do wartości skutecznej składowej podstawowej (oznaczonej we wzorze (10.14) indeksem 1) określany jest przez współczynnik h^1

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

$$h = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} \quad (10.14)$$

Na skutek działania ujemnego sprzężenia zwrotnego współczynnik zawartości harmoniczych h_f w sygnale wyjściowym zmniejsza się zgodnie z zależnością:

$$h_f \approx \frac{h}{1 - k\beta} \quad (10.15)$$

gdzie: h - współczynnik zawartości harmoniczych dla samego wzmacniacza (bez pętli sprzężenia zwrotnego).

- Wpływ ujemnego sprzężenia zwrotnego na impedancję wejściową zależy od zastosowanego układu (rys.10.2). Ujemne sprzężenie szeregowie (tj. sprzężenie napięciowe – szeregowie i prądowe – szeregowie; rys.10.2b i d) zwiększa impedancję wejściową układu. Można to uzasadnić w następujący sposób. Impedancja wejściowa Z_1 jest to:

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{U_{we} - U_{wy\beta}}{I_1} = \frac{U_{we}}{I_1} \left(1 - \frac{U_{wy\beta}}{U_{we}} \right) \quad (10.16)$$

Opierając się na zależnościach (10.9) i (10.11) a więc transmitancjach dla sprzężenia szeregowego można stwierdzić że wzmocnienie pętli sprzężenia zwrotnego wynosi:

$$k_u \beta_u = k_{iu} \beta_{ui} = \frac{U_{wy\beta}}{U_{we}} \quad (10.17)$$

Zatem wzór (10.16) można zapisać w poniższej formie. Impedancja wejściowa układu ze sprzężeniem zwrotnym napięciowym - szeregowym i prądowym szeregowym wynosi:

$$Z_1 = Z_{we}(1 - k_u \beta_u) = Z_{we}(1 - k_{iu} \beta_{ui}) \quad (10.18)$$

Ujemne sprzężenie zwrotne szeregowie zwiększa impedancję wejściową tylekroć ile wynosi wartość współczynnika sprzężenia zwrotnego.

Ujemne sprzężenie równoległe (tj. sprzężenie napięciowe - równoległe i prądowe - równoległe; rys.10.2a i c) zwiększa admitancję wejściową zatem zmniejsza jego impedancję. Można to uzasadnić jak niżej.

Admitancja wejściowa Y_1 układu wynosi:

$$Y_1 = \frac{I_1}{U_1} = \frac{I_{we} - I_{wy\beta}}{U_1} = \frac{I_{we}}{U_1} \left(1 - \frac{I_{wy\beta}}{I_{we}} \right) \quad (10.19)$$

Opierając się na (10.8) i (10.10) a więc na wyrażeniach na transmitancję sprzężenia równoległego można stwierdzić, że wzmocnienie pętli sprzężenia zwrotnego wynosi:

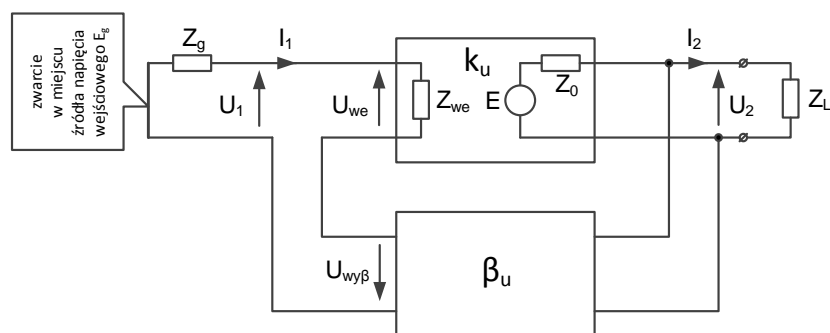
$$k_{ui} \beta_{iu} = k_i \beta_i = \frac{I_{wy\beta}}{I_{we}} \quad (10.20)$$

zatem wzór (10.19) można zapisać w postaci:

$$Y_1 = Y_{we}(1 - k_{ui} \beta_{iu}) = Y_{we}(1 - k_i \beta_i) \quad (10.21)$$

Ujemne sprzężenie zwrotne równoległe zwiększa admitancję wejściową układu tyle razy ile wynosi wartość współczynnika sprzężenia zwrotnego. Impedancja wejściowa będąc odwrotnością admitancji maleje w takim samym stosunku. Zatem sprzężenia zwrotne równoległe zmniejsza impedancję wejściową.

- Wpływ ujemnego sprzężenia zwrotnego na impedancję wyjściową zależy od zastosowanego układu (rys.10.2). Na rysunku 10.3 przedstawionu schemat do wyznaczania impedancji wyjściowej układu ze sprzężeniem zwrotnym napięciowym - szeregowym.



Rys.10.3. Schemat do wyznaczania impedancji wyjściowej układu ze sprzężeniem zwrotnym napięciowym - szeregowym

Blok wzmacniacza k_u od strony wyjścia reprezentuje zgodnie z zasadą Thevenina źródło napięciowe E o impedancji wewnętrznej Z_0 przy czym

$$E = k_{u0} U_{we} \quad (10.22)$$

gdzie k_{u0} – wzmacnienie napięciowe wzmacniacza przy rozwartym wyjściu.

Zgodnie też ze wspomnianą zasadą Thevenina źródło napięcia wejściowego E_g zostało zwarte. Prąd I_2 można określić jako:

$$I_2 = \frac{U_2 - E}{Z_0} = \frac{U_2 - k_{u0} U_{we}}{Z_0} \quad (10.23)$$

Napięcie wyjściowe z bloku sprzężenia zwrotnego $U_{wy\beta}$ odkłada się na szeregowo połączonych impedancjach Z_g i Z_{we} tworząc dzielnik napięciowy dla którego:

$$U_{we} = U_{wy\beta} \frac{Z_{we}}{Z_{we} + Z_g} = \beta_u U_2 \frac{Z_{we}}{Z_{we} + Z_g} \quad (10.24)$$

Podstawiając (10.24) do (10.23) mamy:

$$Z_2 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{Z_0}{1 - \beta_u k_{us0}} \quad (10.25)$$

gdzie: $k_{us0} = k_{u0} \frac{Z_{we}}{Z_{we} + Z_g}$ jest skutecznym wzmacnieniem napięciowym wzmacniacza bez sprzężenia zwrotnego.

Jak widać z (10.25) impedancja wyjściowa układu ze sprzężeniem zwrotnym napięciowym Z_2 zmniejsza się w stosunku do impedancji wyjściowej wzmacniacza Z_0 . Uogólniając: *ujemne sprzężenie napięciowe zmniejsza impedancję wyjściową.*

Stosując podobne rozważania dla sprzężenia zwrotnego prądowego (rys.10.2c i d) można otrzymać zależność:

$$Y_2 = \frac{I_2}{U_2} = \frac{Y_0}{1 - \beta_i k_{isz}} \quad (10.26)$$

gdzie: $k_{isz} = k_{is} \frac{Y_{we}}{Y_{we} + Y_g}$ jest skutecznym wzmacnieniem prądowym wzmacniacza bez sprzężenia zwrotnego.

Na podstawie (10.26) można stwierdzić że *ujemne sprzężenie zwrotne prądowe zmniejsza admitancję wyjściową* układu zatem zwiększa jego impedancję.

• Wpływ ujemnego sprzężenia zwrotnego na wzmacnienie wyrażone jest w zasadzie przez wzór (10.7) określający transmitancję. Transmitancję właściwą dla danego rodzaju sprzężenia tzn. dla konkretnego sposobu połączenia czwórników k i β , przedstawiają wzory (10.8) ÷ (10.11).

Nie wszystkie rodzaje wzmocnienia zmieniają się pod wpływem działania sprzężenia zwrotnego. Przy sprzężeniu równoległym (rys.10.2a i c) napięcie sterujące wzmacniacz U_{we} jest identyczne z napięciem wejściowym U_1 , więc wzmocnienie napięciowe nie ulega zmianie.

$$k_{uf} = k_u \quad \text{dla sprzężeń równoległych} \quad (10.27)$$

Przy sprzężeniu szeregowym (rys.10.2b i d) prąd sterujący wzmacniacza I_1 jest identyczny z prądem wejściowym układu, czyli wzmocnienie prądowe k_i nie zmienia się

$$k_{if} = k_i \quad \text{dla sprzężeń szeregowych} \quad (10.28)$$

W pozostałych przypadkach (k_{if} dla sprzężeń równoległych, k_{uf} dla sprzężeń szeregowych) sprzężenie ujemne zmniejsza wzmocnienia i tak:

$$k_{if} = \frac{k_i}{1 - \beta_i k_i} = \frac{k_{ui}}{1 - \beta_{iu} k_{ui}} \quad \text{dla sprzężeń równoległych} \quad (10.29)$$

$$k_{uf} = \frac{k_u}{1 - \beta_u k_u} = \frac{k_{iu}}{1 - \beta_{ui} k_{iu}} \quad \text{dla sprzężeń szeregowych} \quad (10.30)$$

W tabeli 10.1 przedstawiono zbiorczo skutki działania ujemnego sprzężenia zwrotnego w odniesieniu do wzmocnień i impedancji wzmacniacza:

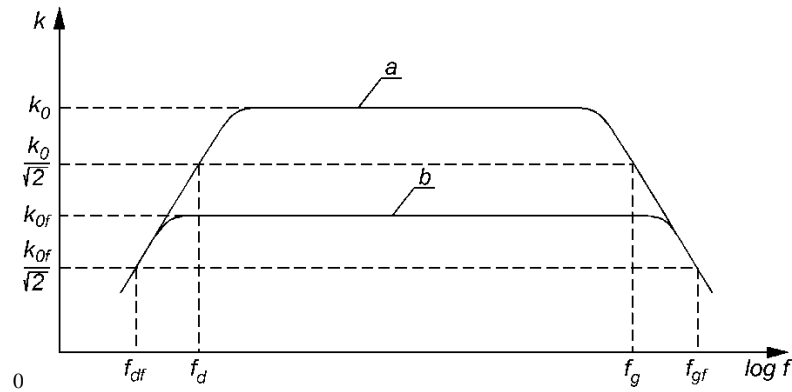
Tabela 10.1. Zależność wzmocnień i impedancji od typu (układu) ujemnego sprzężenia zwrotnego

PARAMETR	TYP SPRZĘŻENIA			
	napięciowe-szeregowe	napięciowe-równoległe	prądowe-szeregowe	prądowe-równoległe
wzmocnienie napięciowe	maleje ↓	bez zmian <i>const</i>	maleje ↓	bez zmian <i>const</i>
wzmocnienie prądowe	bez zmian <i>const</i>	maleje ↓	bez zmian <i>const</i>	maleje ↓
impedancja wejściowa	↑ wzrasta	maleje ↓	↑ wzrasta	maleje ↓
impedancja wyjściowa	maleje ↓	maleje ↓	↑ wzrasta	↑ wzrasta

- Ujemne sprzężenie zwrotne wpływa na kształtowanie charakterystyk częstotliwościowych wzmacniaczy. Mają tu miejsce dwa przypadki:

- 1) gdy transmitancja β nie zmienia się z częstotliwością, ($\beta(f) = \beta_0 = \text{const}$)
- 2) gdy transmitancja β zmienia się z częstotliwością ($\beta(f) \neq \text{const}$)

Dla przypadku pierwszym, gdy transmitancja β nie zmienia się z częstotliwością, sprzężenie zwrotne wpływa na rozszerzenie pasma (rys.10.4).



Rys. 10.4. Charakterystyki przebiegu wzmocnienia w funkcji przenoszonych częstotliwości ilustrujące rozszerzenie pasma przy zachowaniu pola wzmocnienia wzmacniacza: a) wzmacniacz bez sprzężenia; b) wzmacniacz w układzie z ujemnym sprzężeniem zwrotnym

Dla średnich częstotliwości wzmocnienie wzmacniacza wynosi k_0 . Jego trzydecybelowe częstotliwości graniczne to odpowiednio: dolna f_d i górna f_g . Dla układu wzmacniacza z ujemnym sprzężeniem zwrotnym wzmocnienie dla średnich częstotliwości wynosi k_{0f} . Trzydecybelowa częstotliwość graniczna dolna oznaczona jest jako f_{df} oraz górna jako f_{gf} .

Górna częstotliwość graniczna układu z ujemnym sprzężeniem zwrotnym ulega zwiększeniu, w stosunku do wartości górnej częstotliwości granicznej wzmacniacza bez sprzężenia, tyle razy ile razy zmniejsza się wzmocnienie (patrz zależność (10.7)):

$$f_{gf} = f_g(1 - \beta_0 k_0) \quad (10.31)$$

Dolna częstotliwość graniczna układu z ujemnym sprzężeniem zwrotnym ulega zmniejszeniu, w stosunku do dolnej częstotliwości granicznej wzmacniacza bez sprzężenia, proporcjonalnie do redukcji wzmocnienia:

$$f_{df} = \frac{f_d}{(1 - \beta_0 k_0)} \quad (10.32)$$

Iloczyn wzmocnienia k_0 i pasma częstotliwości $\Delta f = f_g - f_d$ nazywamy polem wzmocnienia GB (*gain-bandwidth product*). Pole wzmocnienia pozostaje wartością stałą²:

$$GB = k_0(f_g - f_d) = k_{0f}(f_{gf} - f_{df}) = \text{const} \quad (10.33)$$

Można stwierdzić, że na skutek zastosowania ujemnego sprzężenia zwrotnego nastąpiła wymiana wzmocnienia na pasmo, czyli w tym samym stopniu zmalało wzmocnienie co wzrosło pasmo.

Dla przypadku drugim, gdy transmitancja β zmienia się z częstotliwością, właściwości częstotliwościowe wzmacniacza zależą właśnie od tych zmian. Wzmacniacz z tego rodzaju sprzężeniem zwrotnym nazywany jest filtrem aktywnym.

²Dotyczy to układów o jednobiegunowej funkcji wzmocnienia (transmitancji). W przypadku transmitancji wyższego rzędu ujemne sprzężenie zwrotne powoduje wzrost pola wzmocnienia. Jednobiegunowa funkcja wzmocnienia - funkcja wzmocnienia posiadająca jedno miejsce zerowe mianownika.

10.3. WPŁYW DODATNIEGO SPRĘŻENIA ZWROTNEGO NA WŁAŚCIWOŚCI WZMACNIACZY

Dodatnie sprzężenie zwrotne jest stosowane przede wszystkim w generatorach przebiegów harmonicznym i impulsowym oraz w ograniczonym zakresie w układach wzmacniaczy, głównie w celu uzyskania dużej impedancji wyjściowej.

Sprzężenie zwrotne w tym samym układzie może zmieniać charakter w różnych zakresach częstotliwości, gdy wraz z częstotliwością zmienia się faza transmitancji k i β . Może wystąpić np., w pewnym zakresie częstotliwości, sprzężenie dodatnie w układzie w którym dla częstotliwości średnich występuje sprzężenie ujemne.

W układach impulsowych wykorzystywane są niejednokrotnie właściwości forsujące dodatnich sprzężeń zwrotnych. Oznacza to, że stany elementów tych układów muszą maksymalnie szybko zmieniać się z jednego stanu krańcowego do drugiego. Pokonywany jest w międzyczasie stan przejściowy, w którym obecność układu z punktu widzenia zastosowania jest niepożądana, acz jest konieczna z powodów czysto fizycznych (np. w tranzystorze bipolarnym w drodze ze stanu nasycenia do zatkania i odwrotnie musi nastąpić przejście przez stan aktywny).

Wówczas to zastosowanie dodatniego sprzężenia zwrotnego powoduje, że ledwo zapoczątkowany proces przełączania zostaje znacznie przyspieszony (np. przez wzrost wzmocnienia) przez co osiąga się m.in. znaczną stromość impulsu i wzrost częstotliwości pracy impulsowej.