

UJEMNE SPRZĘŻENIE ZWROTNE

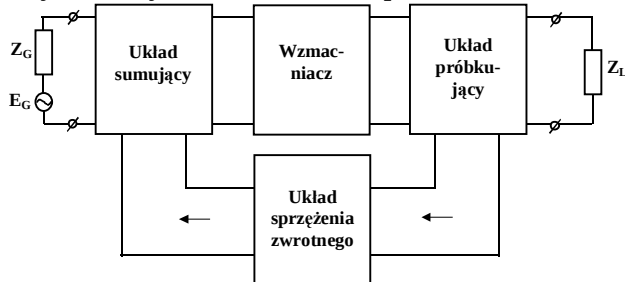
wprowadzenie do ćwiczenia laboratoryjnego

Józef BOKSA

1.	Uwagi ogólne	2
2.	Podstawowe układy sprzężenia zwrotnego	2
3.	Wpływ sprzężenia zwrotnego na właściwości wzmacniaczy	4
3.1.	Wpływ sprzężenia zwrotnego na parametry robocze	4
3.1.1.	Sprzężenie prądowe szeregowo	4
3.1.1.1	Wpływ sprzężenia p-s na wzmocnienie napięciowe	4
3.1.1.2	Wpływ s. p-s na rezystancję wejściową i wyjściową	4
3.1.1.3	Wpływ s. p-s na wzmocnienie prądowe.	4
3.1.1.4	Wpływ s. p-s na wzmocnienie skuteczne.	5
3.1.2.	Sprzężenie napięciowe równoległe	5
3.1.2.1	Wpływ s. n-r na wzmocnienie napięciowe	5
3.1.2.2	Wpływ s. n-r na wzmocnienie prądowe	5
3.1.2.3	Wpływ s. n-r na rezystancję wejściową i wyjściową	5
3.1.2.4	Parametry różnych układów ze sprzężeniem zwrotnym	5
3.2.	Wpływ sprzężenia zwrotnego na charakterystykę częstotliwościową	6
3.2.1	Wpływ na zakres dolnych częstotliwości	6
3.2.2.	Wpływ na zakres górnych częstotliwości	7

1. Uwagi ogólne

Sprężeniem zwrotnym w układach elektronicznych określa się zjawisko polegające na przenoszeniu części sygnału wyjściowego na wejście celem skorygowania własności układu. Przykładowy wzmacniacz ze sprzężeniem zwrotnym zilustrowano na rys. 1 [1].



Rys. 1. Schemat blokowy wzmacniacza ze sprzężeniem zwrotnym

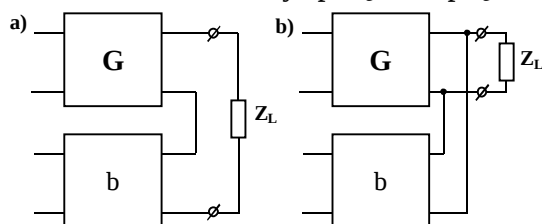
Przy takim połączeniu toru wzmacniającego i toru sprzężenia zwrotnego pobiera się część sygnału z wyjścia i po ewentualnym przetworzeniu, jako tzw. sygnał zwrotny doprowadza się do wejścia, dodając do sygnału ze źródła. Jeżeli polaryzacje (fazy) obu sygnałów na wejściach sumatora są przeciwne, mamy do czynienia z ujemnym, natomiast przy zgodności faz z dodatnim sprzężeniem zwrotnym.

O ile w liniowych układach elektronicznych, szczególnie we wzmacniaczach, stosowane jest głównie ujemne sprzężenie zwrotne, o tyle w układach nieliniowych, np. w generatorach, sprzężenie dodatnie.

2. Podstawowe układy sprzężenia zwrotnego

W zależności od sposobu połączenia toru wzmacniającego G i toru sprzężenia zwrotnego b , które zwykle są czwórnikami, spotyka się różne układy ze sprzężeniem zwrotnym.

Od strony wyjścia czwórniki łączy się zależnie od tego czy próbkowany jest prąd czy napięcie i wówczas rozróżniamy sprzężenie prądowe lub napięciowe – rys. 2.

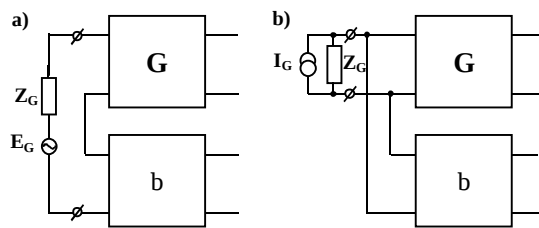


Rys. 2. Układ ze sprzężeniem prądowym a) i napięciowym b)

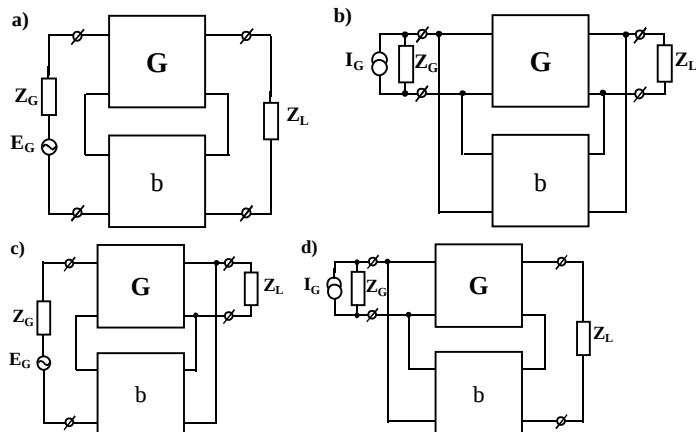
Od strony wejścia może zachodzić sumowanie prądów lub napięć i wówczas rozróżniamy sprzężenie szeregowe lub równoległe – rys. 3.

Łącznie mogą więc wystąpić cztery podstawowe rodzaje sprzężenia zwrotnego – rys. 4:

- prądowe – szeregowe (p-s) – rys. a);
- napięciowe – równoległe (n-r) – rys. b);
- napięciowe - szeregowe (n-s) – rys. c);
- prądowe – równoległe (n-r) – rys. d).



Rys. 3. Układ ze sprzężeniem szeregowym a) i równoległym b)



Rys. 4. Podstawowe układy sprzężenia zwrotnego

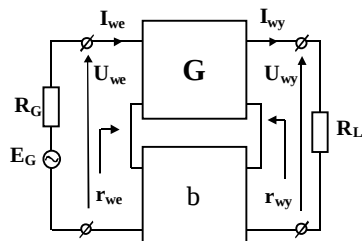
Ujemne sprzężenie zwrotne każdego z czterech typów w szczególności umożliwia:
 zmieniać wartość rezystancji wejściowej i wyjściowej;
 kształtować charakterystyki częstotliwościowe;
 zmniejszyć poziom zniekształceń nieliniowych;
 zmniejszyć wrażliwość układu na zmiany jego parametrów i warunków pracy.
 Wymienione zalety opłaca się redukcją wzmocnienia oraz możliwością niestabilnej pracy układu. Niestabilność układu objawia się pojawieniem się na wyjściu układu nieoczekiwanego przebiegu elektrycznego, tzn. niezamierzoną zmianą funkcji układu ze wzmacniającej na generującą.

3. Wpływ sprzężenia zwrotnego na właściwości wzmacniaczy

3.1. Wpływ sprzężenia zwrotnego na parametry robocze

3.1.1. Sprzężenie prądowe szeregowe

Rozpatrzmy schemat z rys 5.



Rys. 5. Schemat blokowy wzmacniacza ze sprzężeniem prądowym szeregowym

3.1.1.1 Wpływ sprzężenia p-s na wzmocnienie napięciowe.

Założmy, że generator jest idealnym źródłem napięciowym.

Przy braku sprzężenia całe jego napięcie staruje wzmacniaczem G doprowadzając do wyjścia określony wzmocniony poziom sygnału.

Jeśli zastosujemy sprzężenie zwrotne to sygnał z generatora podzieli się na dwie części. Im silniejsze sprzężenie tym więcej odejme się na wejściu, sygnał wejściowy toru G będzie słabszy i sygnał wyjściowy będzie słabszy. Tor G ma nadal to samo wzmocnienie ale jest słabiej sterowany.

Sprzężenie zwrotne prądowe szeregowe (p-s) redukuje wzmocnienie napięciowe.

Jeśli generator nie będzie idealny to analiza będzie nieco złożona ale doprowadzi do takiego samego wniosku. Zawsze można zapewnić niezmienny poziom sygnału na wejściu wzmacniacza a skutki będą takie jak wyżej.

3.1.1.2 Wpływ s. p-s na rezystancję wejściową i wyjściową.

Rezystancja wejściowa jest stosunkiem U_{we} do I_{we} .

Przy założeniu jak wyżej przy braku sprzężenia zwrotnego jedynym obciążeniem generatora jest wzmacniacz (tor G) i rezystancja wejściowa jest równa rezystancji wejściowej toru G . Po włączeniu sprzężenia obciążeniem generatora jest szeregowo połączenie rezystancji toru G i b więc generator jest obciążony większą rezystancją.

Tę analizę można również zastosować do obwodu wyjściowego.

Powyższa analiza jest uproszczona. W szczegółach należy uwzględnić nie jaka jest rezystancja wyjściowa toru b , ale ile „wnosi” do obwodu wyjściowego.

Sprzężenie p-s zwiększa rezystancję wejściową i wyjściową.

3.1.1.3 Wpływ s. p-s na wzmocnienie prądowe.

Ze względu na to, że sprzężenie powoduje wzrost rezystancji wejściowej maleje prąd wejściowy o pewną wartość. O tą samą wartość zmaleje także prąd wyjściowy ale ich stosunek czyli wzmocnienie prądowe pozostanie bez zmian.

Sprzężenie p-s nie zmienia wzmocnienia prądowego.

3.1.1.4 Wpływ s. p-s na wzmocnienie skuteczne.

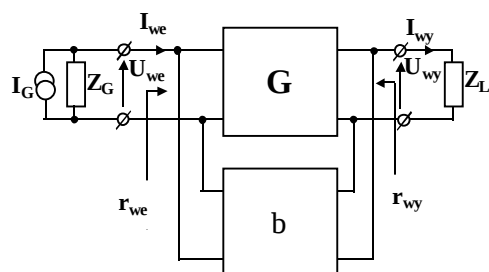
Wprowadzenie sprzężenia p-s nie zmienia wzmocnienia prądowego ale nie można tego uogólniać na wzmocnienie prądowe skuteczne (efektywne). Owszem relacja między prądami (wejściowym i wyjściowym) nie ulega zmianie ale prąd wyjściowy jednak maleje. Jeśli ten prąd zgodnie z definicją wzmocnienia skutecznego odniesiemy do wydajności źródła sygnału (generatora) to otrzymamy wartość mniejszą. Wydajność napięciowa źródła napięciowego czy prądowa źródła prądowego nie zależy od obciążenia, generatora.

Wzmocnienie napięciowe skuteczne także maleje gdyż maleje potencjałne.

Sprzężenie p-s redukuje wzmocnienia skuteczne.

3.1.2. Sprzężenie napięciowe równoległe

Rozpatrzmy schemat z rys 6.



Rys. 6. Schemat blokowy wzmacniacza ze sprzężeniem zwrotnym napięciowym równoległym

3.1.2.1 Wpływ s. n-r na wzmocnienie napięciowe

Jeśli po zastosowaniu sprzężenia uległoby jakiegось zmianie napięcie wejściowe to uległoby też takiej samej zmianie napięcie wyjściowe a ich stosunek pozostanie bez zmian.

Sprzężenie napięciowe równoległe (n-r) nie zmienia wzmocnienia napięciowego.

3.1.2.2 Wpływ s. n-r na wzmocnienie prądowe

Przy braku sprzężenia cały prąd wejściowy struje torem wzmacniającym. Po włączeniu sprzężenia następuje rozpływ prądu wejściowego na dwa tory. Tor G jest sterowany mniejszym prądem powodując zmniejszenie prądu wyjściowego i relacja między prądem wyjściowym a wejściowym pogarsza się.

Sprzężenie napięciowe równoległe redukuje wzmocnienie prądowe.

3.1.2.3 Wpływ s. n-r na rezystancję wejściową i wyjściową.

Jeśli zastosujemy do analizy ten sam tok rozumowania jak przy sprzężeniu p-s to uzyskamy wniosek, że przeciwnie do sprzężenia p-s sprzężenie n-r powoduje zmniejszenie rezystancji wejściowej i wyjściowej.

3.1.2.4 Parametry różnych układów ze sprzężeniem zwrotnym

Wyniki przeprowadzonych rozważań i innych zestawiono zbiorczo w tabeli 1, gdzie symbolami $\uparrow$, $\downarrow$, $=$ oznaczono odpowiednio wzrost, zmniejszenie i niezmiennosc wartości danego parametru.

Tabela 1

Parametr	Sprężenie			
	prądowe- szeregowe	napięciowe- równoległe	napięciowe- szeregowe	prądowe- równoległe
Wzmocnienie skuteczne	↓	↓	↓	↓
Impedancja wejściowa	↑	↓	↑	↓
Impedancja wyjściowa	↑	↓	↓	↑
Wzmocnienie napięciowe	↓	=	↓	=
Wzmocnienie prądowe	=	↓	=	↓

Podsumowując otrzymane wyniki analizy cech wszystkich układów ze sprzężeniem zwrotnym można wyciągnąć następujące wnioski:

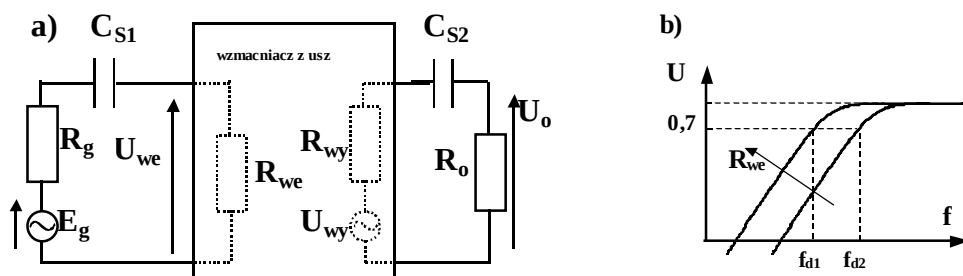
- wzmocnienie prądowe jest niezmiennie dla sprzężeń szeregowych (stałość stosunku prądów oczkowych) a wzmocnienie napięciowe jest niezmiennie dla równoległych (stałość stosunku napięć węzłowych).
- wzmocnienia skuteczne ulegają redukcji bez względu na typ sprzężenia;
- impedancje wejściowe ulegają zwiększeniu dla sprzężeń szeregowych (szeregowe połączenie czwórników G i b na wejściu) a zmniejszeniu dla równoległych (połączenie równoległe);
- impedancje wyjściowe ulegają zwiększeniu dla sprzężeń prądowych (szeregowe połączenie czwórników na wyjściu) a zmniejszeniu dla napięciowych (połączenie równoległe);

3.2. Wpływ sprzężenia zwrotnego na charakterystykę częstotliwościową

3.2.1 Wpływ na zakres dolnych częstotliwości

Wzmacniacze pasmowe realizuje się w większości jako układy ze sprzężeniem pojemnościowym. To powoduje, że posiadają ograniczenia częstotliwościowe w zakresie dolnych i górnych częstotliwości.

Do analizy zakresu dolnych częstotliwości przyjmijmy schemat



Rys. 7. Analiza ograniczeń w zakresie dolnych częstotliwości wzmacniacza ze sprzężeniem zwrotnym

W zakresie średnich częstotliwości kondensatory traktujemy jako zwarcie i uzyskujemy określone wzmocnienie wzmacniacza.

W miarę malenia częstotliwości sygnału z generatora coraz więcej napięcia w obwodzie wejściowym i wyjściowym odkłada się na reaktancjach kosztem rezystancji na wejściu i na obciążeniu wzmacniacza.

Jeśli sprzężenie zwrotne zwiększa rezystancję wejściową to dla danej małej częstotliwości na wejściu wzmacniacza odłoży się większe napięcie niż przy braku sprzężenia. **Wzrost rezystancji w danym obwodzie poprawie własności wzmacniacza w zakresie dolnych częstotliwości a zmniejszenie je pogarsza.**

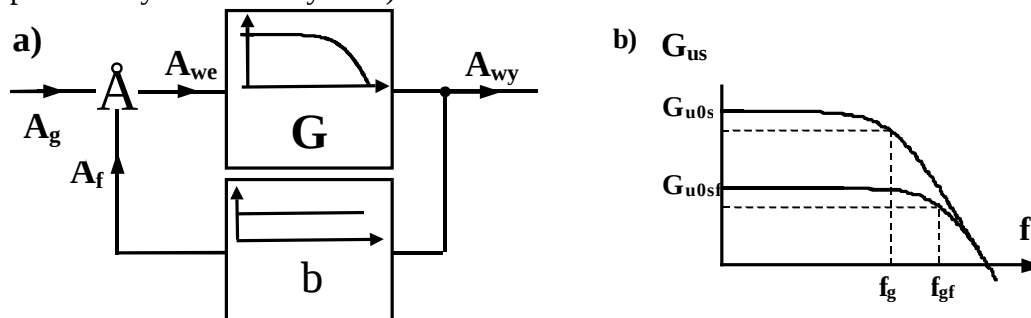
Niekiedy wygodniej jest analizować stałą czasu filtra $t = RC$ gdzie r całkowita rezystancja obwodu równa sumie R_g i R_{we} a $C = C_{s1}$.

Jeśli rezystancja wzrośnie to t wzrośnie a pulsacja graniczna dolna $\omega_d = 1/t$ zmaleje.

Analiza wpływu sprzężenia dla obwodu wyjściowego jest analogiczna.

3.2.2. Wpływ na zakres górnych częstotliwości

Do oceny wpływu sprzężenia zwrotnego na zakres górnych częstotliwości przyjmijmy uproszczony schemat z rys. 8 a)



Rys. 8. Analiza ograniczeń w zakresie górnych częstotliwości wzmacniacza ze sprzężeniem zwrotnym

Po zastosowaniu dowolnego ujemnego sprzężenia zwrotnego maleje wzmocnienie gdyż część sygnału z wyjścia po przejściu przez tor b odejmuje się w sumatorze od sygnału A_g z generatora. Ta część odejmowana A_f zależy od iloczynu G (wzmocnienie) i b (tłumienie).

W zakresie średnich częstotliwości to osłabienie jest jednakowe dla wszystkich sygnałów z tego zakresu częstotliwości – stałość G i b .

Dla zakresu górnych częstotliwości maleje G więc maleje Gb i mimo malenia G w funkcji częstotliwości w sumatorze słabszy sygnał A_f odejmuje się od A_g . Tor G o malejącym wzmocnieniu jest sterowany silniejszym sygnałem A_{we} .

Można analitycznie udowodnić, że mamy tu do czynienia z tzw. wymianą wzmocnienia na pasmo. Ile stracimy na wzmocnieniu tyle zyskamy na paśmie co zilustruje rys. 8 b).

Szczegółowe rozważania dotyczące rozwiązań ideowych analizowanych wzmacniaczy znajdzie czytelnik w [2].

LITERATURA:

[1.] J. Boksa Analogowe układy elektroniczne, BTC, Warszawa 2007

[2.] J. Boksa, J. Kaźmierczak, A. Malinowski *Laboratorium z układów analogowych część I* WAT 2004