

mgr inż. MACIEJ FESZCZUK

wzmacniacze elektroakustyczne

Wydanie drugie uzupełnione



Wydawnictwa Komunikacji i Łączności Warszawa 1982

621.375:534.86

*Opis podstawowych parametrów i zasady działania wzmacniaczy mocy.
Przykłady i sposoby obliczania różnych typów wzmacniaczy mocy.
Konstrukcja i uruchamianie wzmacniaczy mocy. Rozwiązania układów
wzmacniaczy mocy w wykonaniu fabrycznym.
Książka przeznaczona dla radiotechników i radioamatorów.*

Wydanie pierwsze WKŁ 1978, nakład 10 000 egz.

© Copyright by
Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1982

ISBN 83-206-0260-2

Opiniodawca: inż. *Jerzy Sereda*
Redaktor: mgr inż. *Leokadia Kapuściarek*
Redaktor techniczny: *Alicja Jabłońska-Chodzeń*
Korektor: *Alina Podmiotko*

Spis treści

Wstęp	8
1. Podstawowe parametry wzmacniaczy elektroakustycznych	9
1.1. Definicje	9
1.2. Pomiary (według PN-73/T-04500/03)	13
2. Zastosowanie sprzężenia zwrotnego w blokach funkcjonalnych wzmacniaczy elektroakustycznych	23
2.1. Zależności ogólne	23
2.2. Wyznaczanie wzmocnienia napięciowego oraz kształtowanie charakterystyki częstotliwościowej wzmacniacza przy zastosowaniu sprzężenia zwrotnego	26
2.3. Wpływ sprzężenia zwrotnego na eliminację zakłóceń i zniekształceń nieliniowych [3, 22]	30
3. Wzmacniacze mocy	37
3.1. Zasada pracy stopnia komplementarnego	37
3.2. Analiza pracy stopnia sterującego	42
3.2.1. Zastosowanie dynamicznego źródła prądowego	43
3.2.2. Zastosowanie statycznego źródła prądowego	45
3.3. Stopnie wyjściowe wzmacniaczy mocy	46
3.4. Obliczanie wzmacniaczy mocy	51
3.4.1. Obliczanie napięcia zasilania oraz mocy strat w tranzystorach końcowych	51
3.4.2. Obliczanie obwodu tranzystora sterującego	52
3.5. Układy praktyczne wzmacniaczy mocy	55
3.6. Stabilizacja termiczna punktu pracy	60
3.6.1. Stabilizacja prądu spoczynkowego tranzystorów mocy	61
3.6.2. Zastosowanie radiatorów	65
3.7. Układy zabezpieczenia stosowane we wzmacniaczach mocy	70
3.7.1. Zabezpieczenie przed zwarcie wyjścia wzmacniacza	70

3.7.2. Zabezpieczenie wzmacniacza przed obciążeniami o charakterze reaktan- cyjnym oraz przed szkodliwymi oscylacjami	78
3.7.3. Przeciwdziałanie nadmiernemu wzrostowi temperatury	82
3.7.4. Dodatkowe wyposażenie wzmacniaczy mocy	83
3.8. Przykład obliczania wzmacniacza mocy z układem typu <i>bootstrap</i>	92
3.9. Przykład obliczania wzmacniacza mocy z układem statycznego źródła prą- dowego	99
3.10. Mostkowe wzmacniacze mocy	105
3.11. Minimalizacja zniekształceń TIM we wzmacniaczach mocy	108
3.12. Wzmacniacze mocy w wersji scalonej	114
3.12.1. Układy monolityczne	114
3.12.2. Zastosowanie hybrydowych układów grubowarstwowych	121
3.13. Zastosowanie monolitycznych wzmacniaczy operacyjnych we wzmacnia- czach mocy	123
4. Wzmacniacze napięciowe	126
4.1. Przedwzmacniacz wejściowy	127
4.1.1. Przedwzmacniacze korekcyjne do gramofonu z przetwornikiem magne- tycznym	130
4.1.2. Przedwzmacniacze do gramofonu z przetwornikiem piezoelektrycznym	134
4.1.3. Przedwzmacniacze mikrofonowe	137
4.1.4. Przedwzmacniacze dla tunera i magnetofonu	140
4.1.5. Uniwersalny przedwzmacniacz wejściowy	141
4.2. Układy regulacji barwy dźwięku	141
4.2.1. Regulatory biernie	143
4.2.2. Regulatory aktywne	149
4.3. Regulacja wzmocnienia i regulacja fizjologiczna (<i>loudness</i> — ang., <i>contur</i> — niem.)	154
4.4. Filtr antyszumowy i antywibracyjny	156
4.5. Układy zwiększające zrozumiałość audycji słownych (ang. <i>presence</i>)	158
4.6. Układy regulacji równoważenia kanałów (balans)	162
4.6.1. Równoważenie wzmocnienia	162
4.6.2. Równoważenie tonów	163
4.7. Korektory graficzne (ang. <i>graphic equalizer</i>)	165
5. Zasilacze wzmacniaczy m.cz.	171
5.1. Zasilacze wzmacniaczy mocy	171
5.2. Zasilacze wzmacniaczy napięciowych	178
6. Konstrukcja i uruchamianie wzmacniaczy m.cz.	180
6.1. Konstrukcja	180
6.2. Uruchamianie wzmacniaczy mocy	191
6.3. Uruchamianie stopni wzmacniacza napięciowego	197
7. Przegląd rozwiązań wzmacniaczy m.cz. w wykonaniu fabrycznym	200
7.1. Wzmacniacze mocy	200
7.2. Wzmacniacz napięciowy	218

7.3. Kompletny układ wzmacniacza stereofonicznego odbiornika Beomaster 2000 firmy Bang & Olufsen (Dania)	220
7.4. Kompletny układ wzmacniacza stereofonicznego odbiornika Hi-Fi Receiver 20 firmy Grundig	222
7.5. Wzmacniacz napięciowy SU-9600 firmy Technics	224
7.6. Wzmacniacz mocy SE-9600 firmy Technics	230
Literatura	234

WSTĘP

Wzmacniacze elektroakustyczne stanowią ogniwo pośrednie pomiędzy źródłem sygnału a głośnikiem.

Aby otrzymać możliwie wysoką wierność transmitowanego dźwięku, cały tor elektroakustyczny musi mieć odpowiednio dobre parametry. Do klasyfikacji produkowanych urządzeń elektronicznych powszechnego użytku opracowano specjalne normy, na których podstawie następuje przyporządkowanie konkretnych urządzeń odpowiednim klasom jakościowym. Klasę najwyższą stanowią urządzenia Hi-Fi (*ang. high fidelity* – wysoka wierność). Normy te obowiązują również dla wzmacniaczy małej częstotliwości.

W pracy tej przedstawiono podstawowe bloki wchodzące w skład wzmacniaczy elektroakustycznych wysokiej klasy oraz sposoby ich projektowania.

Szczególne uwagi zostały zwrócone na wzmacniacze mocy, które należą do najbardziej krytycznych fragmentów toru z uwagi na wnoszone zniekształcenia nieliniowe oraz ciepło wydzielane w elementach czynnych. Omówiono również przykłady scalonych wzmacniaczy mocy.

W dalszej części pracy przedstawiono zalecenia konstrukcyjne dotyczące budowy wzmacniaczy małej częstotliwości oraz sposoby ich uruchamiania.

Aby umożliwić zapoznanie się z konstrukcjami czołowych firm światowych, ostatni rozdział poświęcono przeglądowi gotowych rozwiązań.

1

PODSTAWOWE PARAMETRY WZMACNIACZY ELEKTROAKUSTYCZNYCH

Obiektywną ocenę wartości i przydatności każdego urządzenia można otrzymać jedynie drogą dokładnych pomiarów jego podstawowych parametrów. Wymagania te odnoszą się również do wzmacniaczy elektroakustycznych.

1.1. Definicje

Do podstawowych parametrów charakteryzujących wzmacniacz elektroakustyczny należy zaliczyć:

- a) współczynnik zawartości harmonicznych,
- b) współczynnik zniekształceń intermodulacyjnych,
- c) znamionową moc wyjściową,
- d) charakterystykę przenoszenia,
- e) pasmo przenoszenia mocy,
- f) impedancję wejściową,
- g) impedancję wewnętrzną,
- h) znamionowe napięcie wejściowe,
- i) tłumienie przesłuchu między poszczególnymi wejściami wzmacniacza,
- j) tłumienie przesłuchu między kanałami wzmacniacza stereofonicznego,
- k) poziom zakłóceń i szumów.

Współczynnik zawartości harmonicznych – wyznaczany jest na podstawie pomiaru amplitud napięć o częstotliwościach harmonicznych, występujących na wyjściu wzmacniacza pobudzanego sygnałem sinusoidalnym,

i obliczany z zależności:

$$h = \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + U_5^2 + \dots}{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + U_5^2 + \dots}} \cdot 100\% \quad (1.1)$$

Zgodnie z PN-74/T-06251/07 współczynnik zawartości harmonicznych dla wzmacniaczy Hi-Fi nie może przekraczać:

1% — dla wzmacniaczy wejściowych w zakresie częstotliwości 40 ÷ 4000 Hz przy pełnymysterowaniu,

1% — dla wzmacniaczy mocy i wzmacniaczy pełnych w pasmie przenoszenia mocy w zakresie częstotliwości 40 Hz ÷ 12,5 kHz i w zakresie mocy wyjściowej od znamionowej do zmniejszonej o 20 dB.

Na krańcach zakresu moc może spadać przy podanych zniekształceniach najwyżej o 3 dB.

Współczynnik zniekształceń intermodulacyjnych — jest — podobnie jak współczynnik zawartości harmonicznych — jedną z miar liniowości wzmacniacza, która jest niezbędna do wiernego przenoszenia sygnałów elektrycznych. Ocena jego polega na pomiarze amplitud napięć o częstotliwościach będących wynikiem mieszania dwóch sygnałów o różnych częstotliwościach, doprowadzonych jednocześnie do wejścia wzmacniacza. Zjawisko tu występujące jest podobne do powstającego w klasycznych mieszaczach radiowych. Jak wiadomo, częstotliwości będące sumą i różnicą częstotliwości podstawowych powstają tylko w układach nieliniowych, dlatego wartość tego współczynnika jest ściśle związana z liniowością charakterystyki wzmocnienia wzmacniacza. Współczynnik zniekształceń intermodulacyjnych m oblicza się na podstawie zależności:

$$m = \frac{\sqrt{(U_{f_2-f_1} + U_{f_2+f_1})^2 + (U_{f_2+2f_1} + U_{f_2-2f_1})^2 + (U_{f_2+3f_1} + U_{f_2-3f_1})^2 + (U_{f_2+4f_1} + U_{f_2-4f_1})^2}}{U_{f_2}} \cdot 100\% \quad (1.2)$$

gdzie $U_{f_2-f_1}$ jest amplitudą napięcia o częstotliwości f_2-f_1 itd. Jako częstotliwości podstawowe przyjęto: $f_1 = 250$ Hz, $f_2 = 8$ kHz, o stosunku amplitud $U_{f_1}/U_{f_2} = 4$.

Napięcie o częstotliwości f_1 ustala się tak, aby napięcie wyjściowe wzmacniacza wynosiło 80% napięcia nominalnego. Zgodnie z normą PN-74/T-06251/07 współczynnik zniekształceń intermodulacyjnych dla wzmacniaczy Hi-Fi nie może przekraczać 3%.

Znamionowa moc wyjściowa — jest to moc, którą wzmacniacz może wydzielić na znamionowej impedancji obciążenia przy danej częstotliwości

lub w danym pasmie częstotliwości, bez przekroczenia określonego współczynnika zniekształceń nieliniowych, w ciągu 10 minut.

Zgodnie z PN-74/T-06251/07 minimalna znamionowa moc wyjściowa dla wzmacniaczy Hi-Fi powinna wynosić:

- 10 W dla wzmacniaczy monofonicznych,
- 2×6 W dla wzmacniaczy stereofonicznych.

Muzyczna moc wyjściowa — określana jest identycznie jak znamionowa moc wyjściowa. Różnica w wartości wynika z faktu, że moc znamionowa mierzona jest przy trwałymysterowaniu wzmacniacza, natomiast moc muzyczna — przy chwilowym. Jeżeli wzmacniacz wyposażony jest w dobry stabilizator napięcia, moc muzyczna będzie równa mocy znamionowej, natomiast przy wykorzystaniu zasilaczy niestabilizowanych, których napięcie wykazuje znaczne wahania przy zmianach obciążenia, moc muzyczna będzie miała wartość większą od mocy znamionowej.

Pasmo przenoszenia wzmacniacza — zgodnie z normą PN-74/T-06251/07 dla wzmacniaczy Hi-Fi minimalne pasmo przenoszenia powinno wynosić 40 Hz ÷ 16 kHz.

Dopuszczalne odchylenia charakterystyki przenoszenia od krzywej wzorcowej odniesione do częstotliwości 1 kHz nie powinny przekraczać:

- $\pm 1,5$ dB — dla wejść liniowych,
- ± 2 dB — dla wejść korekcyjnych.

Przebieg wzorcowej charakterystyki przenoszenia wzmacniacza dla wejść korekcyjnych (wejścia gramofonowe) przedstawiono w tablicy 1.1.

Pasmo przenoszenia mocy — zakres częstotliwości, wewnątrz którego przy danym współczynniku zawartości harmonicznych moc wyjściowa spada na krańcach zakresu o 3 dB (do połowy wartości mocy znamionowej).

Impedancja wejściowa wzmacniacza — jest to impedancja, jaką przedstawia sobą wejście wzmacniacza dla znamionowych warunków pracy. Wymagane wartości impedancji wejściowej dla poszczególnych rodzajów wejść zestawiono w tablicy 4.1 (p. 4.1).

Impedancja wewnętrzna wzmacniacza (impedancja wyjściowa) — decyduje o wartości impedancji obciążenia, która może być dołączana przy określonej sprawności wzmacniacza.

Zgodnie z PN-74/T-06251/07 impedancja wewnętrzna nie może przekraczać $1/3$ znamionowej impedancji obciążenia w zakresie częstotliwości 40 Hz ÷ 12,5 kHz.

Znamionowe napięcie wejściowe (czułość) — jest to napięcie na wejściu wzmacniacza, które przy regulatorze wzmocnienia ustawionym na maksimum, przy określonej częstotliwości, zapewnia na wyjściu moc znamionową.

Częstotliwość [Hz]	Poziom [dB]	Częstotliwość [Hz]	Poziom [dB]
40	+17,8	4 000	-6,6
60	+16,1	6 000	-9,6
80	+14,5	8 000	-11,9
120	+11,9	10 000	-13,7
250	+6,7	12 000	-15,3
500	+2,6	14 000	-16,6
1 000	0	16 000	-17,7
2 000	-2,6		

Zgodnie z normą PN-74/T-06251/07 dla wzmacniaczy Hi-Fi znamionowe napięcie wejściowe dla wejść liniowych na impedancji wejściowej wynoszącej co najmniej 470 kΩ i zapewniające uzyskanie znamionowej mocy wyjściowej przy częstotliwości 1000 Hz nie powinno przekraczać 0,5 V. Znamionowe napięcie wejściowe dla wejść korekcyjnych na impedancji wejściowej wynoszącej co najmniej 47 kΩ i zapewniające uzyskanie znamionowej mocy wyjściowej przy częstotliwości 1000 Hz, nie powinno przekraczać 5 mV.

Tłumienie przesłuchu między poszczególnymi wejściami wzmacniacza — określane jest jako stosunek poziomu wyjściowego napięcia znamionowego lub mocy znamionowej danego kanału do poziomu napięcia lub mocy, który otrzymuje się na jego wyjściu na skutek przesłuchu po odłączeniu wejścia od tego kanału i przełączeniu wzmacniacza na pracę z innym wejściem, jeśli na odłączane wejście przyłożone jest napięcie znamionowe, a regulator siły głosu ustawiony jest na maksimum.

Zgodnie z PN-74/T-06251/07 tłumienie przesłuchu między poszczególnymi wejściami powinno wynosić co najmniej:

50 dB — dla częstotliwości 1000 Hz,

40 dB — dla częstotliwości w zakresie 250 ÷ 10 000 Hz przy znamionowym napięciu wejściowym kanału zakłócającego.

Tłumienie przesłuchu między kanałami stereofonicznymi — określane jest jako stosunek poziomu wyjściowego (napięcia lub mocy) kanału sterowanego sygnałem do poziomu wyjściowego kanału niesterowanego, do którego

sygnał przedostaje się przez szkodliwe sprzężenia. Zgodnie z PN-74/T-06251/07 tłumienie przesłuchu między kanałami we wzmacniaczach stereofonicznych powinno wynosić co najmniej:

40 dB — dla częstotliwości 1000 Hz,

30 dB — w zakresie częstotliwości 250 ÷ 10 000 Hz.

Stosunek sygnał/zakłócenia — określany jest jako stosunek napięcia sygnału odpowiadającego mocy wyjściowej 100 mW dla wzmacniaczy monofonicznych i 50 mW na jeden kanał dla wzmacniaczy stereofonicznych, do wszystkich innych niepożądanych sygnałów na wyjściu — takich jak szumy, przydźwięk itp. — występujących w pasmie 31,5 ÷ 20 000 Hz.

Zgodnie z normą PN-74/T-2651/07 stosunek napięcia sygnału do napięcia zakłóceń dla wzmacniaczy Hi-Fi powinien wynosić co najmniej 50 dB — dla wzmacniaczy wejściowych (odniesiony do znamionowych napięć wyjściowych przy częstotliwości 1000 Hz i przy obciążeniu wzmacniaczy znamionowymi impedancjami); 50 dB — dla wzmacniaczy mocy i wzmacniaczy pełnych o mocy wyjściowej do 20 W (odniesiony do mocy 100 mW dla wzmacniaczy monofonicznych lub 2 × 50 mW dla wzmacniaczy stereofonicznych).

Dla wzmacniaczy mocy i wzmacniaczy pełnych o mocy wyjściowej większej od 20 W dopuszczalną wartość stosunku napięcia sygnału do napięcia zakłóceń obniża się proporcjonalnie do wzrostu mocy.

Tolerancja charakterystyk przenoszenia kanałów wzmacniaczy stereofonicznych — określane są jako różnice charakterystyk zniekształceń tłumieniowych kanałów stereofonicznych wzmacniacza przy zmniejszeniu za pomocą regulatora wzmocnienia wzmacniacza od maksymalnego do 40 dB.

Zgodnie z normą PN-74/T-06251/07, maksymalne różnice charakterystyk wzmocnienia kanałów dla wzmacniaczy Hi-Fi, mierzone w zakresie częstotliwości 250 ÷ 6300 Hz, nie powinny przekraczać 3 dB.

We wzmacniaczach z regulacją współbieżności kanałów (balans), umożliwiającą zmianę charakterystyki wzmocnienia większą niż 8 dB, różnice tych charakterystyk nie powinny przekraczać 6 dB.

1.2. Pomiary (według PN-73/T-04500/03)

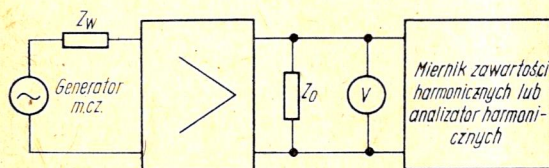
Przed przystąpieniem do pomiarów wzmacniacz należy doprowadzić do znamionowych warunków pracy.

Dla wzmacniacza m. cz. są to następujące wymagania:

- wzmacniacz zasilany jest z sieci o znamionowym napięciu i częstotliwości, których wahania nie powinny przekraczać $\pm 1\%$,
- wyjście wzmacniacza obciążone jest normalnym obciążeniem zastępczym (za normalne obciążenie zastępcze uważa się rezystancję o określonej przez producenta wartości, równej modułowi impedancji przy częstotliwości 1000 Hz, która zastępuje odpowiednio: głośnik, zespół głośników lub wejście następnego członu wzmacniającego); w przypadku wzmacniacza stereofonicznego dotyczy to wejść obydwu kanałów,
- regulator wzmocnienia ustawiony jest na maksimum,
- regulator równoważenia kanałów, o ile istnieje, jest ustawiony w położeniu zerowym,
- regulatory barwy dźwięku są ustawione w położeniu zapewniającym uzyskanie płaskiej charakterystyki przenoszenia lub maksymalnie do niej zbliżonej,
- do odpowiedniego wejścia dołączone jest źródło sygnału sinusoidalnego o częstotliwości 1000 Hz, o impedancji wewnętrznej przewidzianej do współpracy z danym wejściem. Poziom sygnału powinien zapewniać uzyskanie na wyjściu znamionowej mocy wyjściowej.
- pozostałe wejścia obciążane są znamionowymi impedancjami źródeł, przewidzianymi do współpracy z danym wejściem.

Pomiar współczynnika zawartości harmonicznych

Wzmacniacz jest włączany jak na rys. 1.1. Na jego wyjściu należy zmierzyć moc wyjściową i współczynnik zawartości harmonicznych. Moc wyjściową określa się przez pomiar napięcia wyjściowego na obciążeniu zastępczym (głośnika lub kolumny).



Rys. 1.1. Układ do pomiaru zawartości harmonicznych
 Z_w – znamionowa impedancja źródła przewidzianego do współpracy ze wzmacniaczem; w układzie pomiarowym jest ona zaznaczona razem z impedancją wewnętrzną generatora, Z_o – normalne obciążenie zastępcze

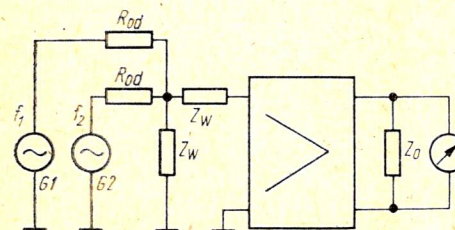
Współczynnik zawartości harmonicznych na wyjściu mierzy się miernikiem zniekształceń harmonicznych, wskazującym bezpośrednio wartość współczynnika, lub analizatorem harmonicznych, mierząc poszczególne składowe widma i obliczając współczynnik według wzoru (1.1).

- Wartość współczynnika zawartości harmonicznych należy wyznaczyć: w funkcji częstotliwości przy stałej mocy wyjściowej; pomiar wykonuje się zmieniając częstotliwość sygnału wejściowego i ustalając dla każdej częstotliwości takie napięcie wejściowe, przy którym moc wyjściowa pozostaje stała; dla każdej częstotliwości mierzy się współczynnik zawartości harmonicznych na wyjściu wzmacniacza,
- w funkcji napięcia wejściowego przy stałej częstotliwości; pomiar wykonuje się dla określonej częstotliwości, zmieniając napięcie wejściowe i utrzymując stałą moc wyjściową wzmacniacza za pomocą regulatora wzmocnienia; dla każdego położenia regulatora wzmocnienia mierzy się napięcie wejściowe oraz współczynnik zawartości harmonicznych,
- w funkcji mocy wyjściowej przy stałej częstotliwości; pomiar wykonuje się przy określonej częstotliwości – zmieniając napięcie wejściowe mierzy się moc wyjściową oraz współczynnik zawartości harmonicznych,
- w funkcji napięcia wejściowego przy stałym wzmocnieniu wzmacniacza i przy stałej częstotliwości; dla określonego wzmocnienia pomiar wykonuje się zmieniając napięcie wejściowe i mierząc napięcie oraz zawartość harmonicznych na wyjściu wzmacniacza.

Pomiar zniekształceń intermodulacyjnych

Pomiar przeprowadza się w układzie jak na rys. 1.2.

Na wejście wzmacniacza podaje się dwa odpowiednio odsprężone sygnały, jeden o częstotliwości $f_1 = 250$ Hz, drugi o częstotliwości $f_2 = 8000$ Hz. Rezystory odsprężające R_{od} powinny być tak dobrane, aby gene-



Rys. 1.2. Układ do pomiaru zniekształceń intermodulacyjnych
 R_{od} – rezystory odsprężające, Z_w – znamionowa impedancja źródła przewidzianego do współpracy ze wzmacniaczem, Z_o – normalne obciążenie zastępcze

ratory nie wpływały na siebie. Początkowo napięcie generatora G2 ustawia się na zero, natomiast napięcie generatora G1 ustawia się tak, aby na wyjściu wzmacniacza było napięcie równe 80 % znamionowej wartości napięcia wyjściowego (co odpowiada 64 % wartości mocy znamionowej). Następnie zwiększa się napięcie generatora G2 tak, aby wyniosło ono 25 % wartości uprzednio na-

stawionego napięcia wejściowego generatora $G1$ i mierzy się za pomocą analizatora harmonicznego napięcia na wyjściu: U_{f2} ; U_{f2-f1} ; U_{f2+f1} ; U_{f2-2f1} ; U_{f2+2f1} ; U_{f2-3f1} ; U_{f2+3f1} ; U_{f2-4f1} ; U_{f2+4f1} .

Współczynnik zniekształceń intermodulacyjnych oblicza się według wzoru (1.2). Pomiaru można dokonać również przy użyciu miernika zniekształceń intermodulacyjnych, przy czym układ pomiarowy jest taki sam jak w przypadku analizatora harmonicznego. Pomiar wykonuje się dla mocy znamionowej oraz dla mocy 50 mW w każdym kanale, przy płaskiej charakterystyce przenoszenia.

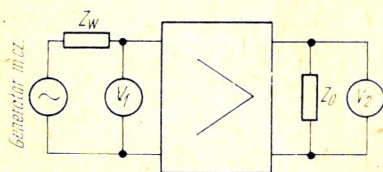
Pomiar mocy znamionowej wzmacniacza

Wzmacniacz włącza się według rysunku 1.1 i reguluje jak dla znamionowych warunków pracy. Znamionową moc wyjściową mierzy się przy częstotliwości 1000 Hz. Dopuszcza się pomiar przy innej częstotliwości. Na wejście wzmacniacza podaje się taki sygnał, aby otrzymać na wyjściu określone zniekształcenia nieliniowe. Moc odpowiadająca tym zniekształceniom równa się mocy znamionowej.

Charakterystyka przenoszenia

Pomiar elektrycznej charakterystyki zniekształceń tłumieniowych dla wejść liniowych.

Wzmacniacz łączy się w układzie z rys. 1.3, ustalając znamionowe warunki pracy. Następnie zmniejsza się sygnał na wejściu o 10 dB. Zmieniając częstotliwość sygnału na wejściu, mierzy się napięcie wyjściowe na normalnym



Rys. 1.3. Układ do pomiaru charakterystyk zniekształceń tłumieniowych

Z_W — znamionowa impedancja źródła przewidzianego do współpracy ze wzmacniaczem, Z_0 — normalne obciążenie zastępcze

obciążeniu zastępczym Z_0 . Podczas pomiaru należy zwracać uwagę, aby przez cały czas utrzymywać stałe napięcie na wejściu wzmacniacza. Dopuszcza się pomiar, przy którym utrzymuje się stałe napięcie generatora. Pomiar charakterystyki zniekształceń tłumieniowych dla wejść korekcyjnych polega na tym, że na wejście korekcyjne wzmacniacza podaje się przez impedancję Z_W napięcie o 20 dB mniejsze od znamionowego napięcia wejściowego przy częstotliwości 1000 Hz.

Pomiar pasma przenoszenia mocy

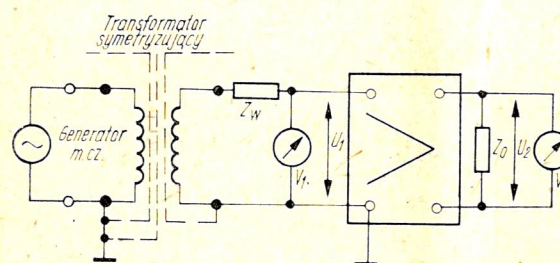
Pomiar wykonuje się w układzie z rys. 1.1, doprowadzając wzmacniacz do znamionowych warunków pracy. Następnie zwiększa się amplitudę sygnału wejściowego do takiej wartości, aby na wyjściu otrzymać określony współczynnik zawartości harmonicznego i określa się moc wyjściową.

Pomiar wykonuje się w funkcji częstotliwości dla stałej wartości współczynnika zawartości harmonicznego, a z otrzymanych wyników określa się pasmo przenoszenia mocy.

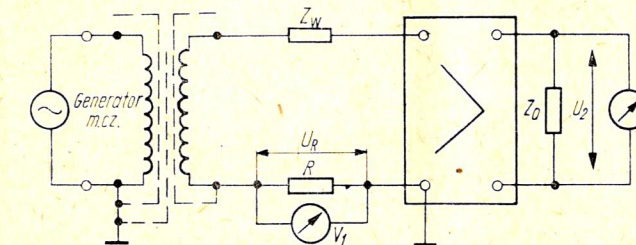
Pomiar impedancji wejściowej

Wzmacniacz łączy się w układzie z rys. 1.4, doprowadzając do znamionowych warunków pracy. Mierzy się napięcie wyjściowe U_2 i napięcie wejściowe U_1 . Następnie włącza się szeregowo ze źródłem sygnału (rys. 1.5) znany rezystor o wartości R równej 0,1 modułu impedancji wejściowej, a napięcie sygnału zwiększa się tak, aby ponownie na wyjściu uzyskać napięcie U_2 . Mierzy się napięcie U_R na rezystorze R . Moduł impedancji wejściowej określa się z wzoru:

$$Z_W = \frac{U_1}{U_R} R \quad (1.3)$$



Rys. 1.4. Układ do pomiaru impedancji wejściowej wzmacniacza
 Z_W — znamionowa impedancja źródła przewidzianego do współpracy ze wzmacniaczem, Z_0 — normalne obciążenie zastępcze

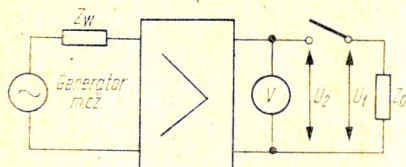


Rys. 1.5. Układ do pomiaru impedancji wejściowej wzmacniacza

Z_W — znamionowa impedancja źródła przewidzianego do współpracy ze wzmacniaczem, R — rezystancja o wartości około 0,1 modułu impedancji wejściowej wzmacniacza, Z_0 — normalne obciążenie zastępcze

Pomiar impedancji wewnętrznej

Wzmacniacz łączy się w układzie z rys. 1.6, doprowadzając do znamionowych warunków pracy. Przy włączonym wyłączniku mierzy się napięcie wyjściowe U_1 . Następnie odłącza się obciążenie Z_o i mierzy napięcie U_2 na wyjściu wzmac-



Rys. 1.6. Układ do pomiaru impedancji wewnętrznej

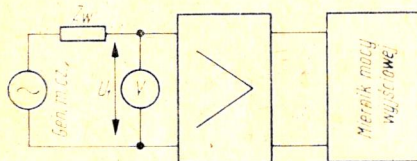
Z_w — znamionowa impedancja źródła przewidzianego do współpracy ze wzmacniaczem, Z_o — normalne obciążenie zastępcze

niacza przy biegu luzem. Moduł impedancji wewnętrznej określa się z wzoru:

$$Z_i = Z_o \frac{U_2 - U_1}{U_1} \quad (1.4)$$

Pomiar znamionowego napięcia wejściowego

Wzmacniacz łączy się w układzie jak na rys. 1.7, doprowadzając do znamionowych warunków pracy. Następnie odczytuje się znamionowe napięcie wejściowe U_1 .



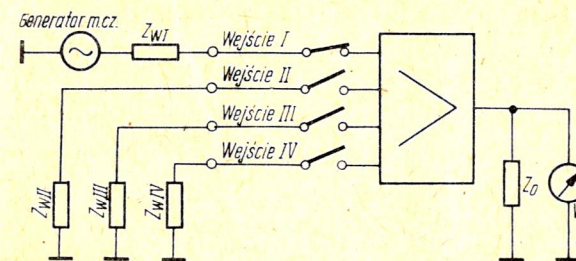
Rys. 1.7. Układ do pomiaru znamionowego napięcia wejściowego

Z_w — znamionowa impedancja źródła przewidzianego do współpracy ze wzmacniaczem

Pomiar tłumienia przesłuchu między różnymi wejściami wzmacniacza

Wzmacniacz łączy się w układzie jak na rys. 1.8 i dla jednego wejścia reguluje się tak, jak dla znamionowych warunków pracy. Pozostałe wejścia obciąża się znamionowymi impedancjami wejściowymi. Wzmacniacz kolejno przełącza się na pracę z pozostałymi wejściami i odczytuje się poziomy napięcia lub mocy na wyjściu wzmacniacza, które odniesione do poziomu napięcia lub mocy znamionowej dają przesłuchy do poszczególnych wejść.

Przez zasilanie pozostałych wejść i powtórzenie pomiarów otrzymuje się wszystkie wartości przesłuchu wejść względem siebie. Tłumienie przesłuchu wyraża się w dB. Pomiary należy wykonać w funkcji częstotliwości.

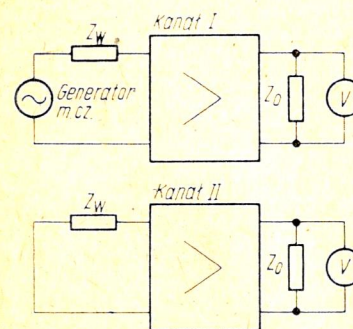


Rys. 1.8. Układ do pomiaru tłumienia przesłuchu pomiędzy różnymi wejściami wzmacniacza

Z_{wI} , Z_{wII} , Z_{wIII} , Z_{wIV} — znamionowe impedancje źródeł przewidzianych do współpracy z poszczególnymi wejściami, Z_o — normalne obciążenie zastępcze

Pomiar tłumienia przesłuchu między kanałami stereofonicznymi

Dla obu kanałów ustala się znamionowe warunki pracy jak na rys. 1.9 i mierzy napięcie U_I na wyjściu I kanału. Następnie odłącza się źródło sterujące II kanał, a jego wejście obciąża się impedancją Z_w i mierzy napięcie U_{II} na jego wyjściu II. Tłumienie przesłuchu wynosi $B = 20 \lg \frac{U_I}{U_{II}}$. Pomiary przeprowa-



Rys. 1.9. Układ do pomiaru tłumienia przesłuchu między kanałami stereofonicznymi

Z_w — znamionowa impedancja źródła sygnału przewidzianego do współpracy ze wzmacniaczem, Z_o — normalne obciążenie zastępcze

dza się w funkcji częstotliwości. W analogiczny sposób przeprowadza się pomiar przesłuchu z kanału II do kanału I. Jako wartość przesłuchu przyjmuje się wartość mniejszą. Pomiary można przeprowadzić dla różnych ustawień barwy dźwięku i dla różnych poziomów mocy wyjściowej.

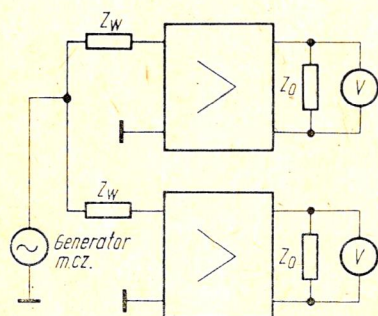
Pomiar stosunku sygnał/zakłócenia

Wzmacniacz łączy się w układzie jak na rys. 1.3 i reguluje tak jak dla znamionowych warunków pracy. W przypadku wzmacniacza stereofonicznego dotyczy to obu kanałów. Następnie regulatorem wzmocnienia ustawia się na wyjściu wzmacniacza napięcie sygnału odpowiadające mocy 100 mW dla wzmacniaczy monofonicznych i 2×50 mW dla wzmacniaczy stereofonicznych.

Z kolei odłącza się generator, a poszczególne wejścia obciąża się znamionowymi impedancjami wejściowymi i mierzy napięcie zakłócające na wyjściu. Stosunek sygnał/zakłócenia wyraża się w dB. W przypadku pomiarów wzmacniaczy zasilanych z sieci prądu przemiennego pomiar wykonuje się dla obu położań wtyczki sieciowej.

Pomiar różnicy charakterystyk przenoszenia kanałów wzmacniaczy stereofonicznych

Wzmacniacz łączy się w układzie jak na rys. 1.10 i reguluje jak dla znamionowych warunków pracy dla obu kanałów, przv czym sygnał wejściowy ustala się tak, aby na wyjściu wzmacniacza uzyskać moc o 6 dB mniejszą od pełnegoysterowania. Następnie zoejmuje się charakterystyki zniekształceń tłumienio- wych poszczególnych kanałów dla różnych ustaleń regulatora wzmocnienia.



Rys. 1.10. Układ do pomiaru różnicy charakterystyk przenoszenia kanałów stereofonicznych

Z_w — znamionowa impedancja źródła przewidzianego do współpracy ze wzmacniaczem, Z_o — normalne obciążenie zastępcze

Pomiar dynamicznych zniekształceń intermodulacyjnych

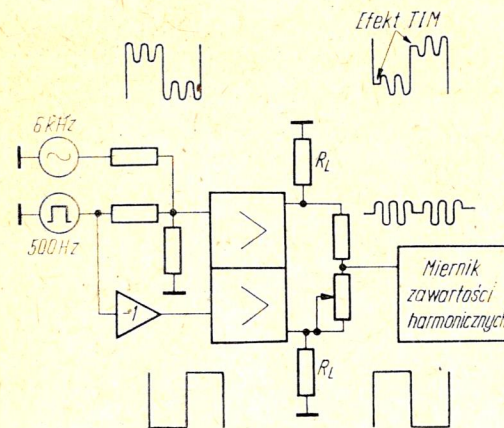
Dynamiczne zniekształcenia intermodulacyjne powstają w wyniku procesów zachodzących we wzmacniaczu w warunkachysterowania złożonym sygnałem.

Jedną z form zniekształceń tego typu są zniekształcenia TIM (ang. *Transient Intermodulation Distortion*) — zniekształcenia intermodulacyjne w stanach nieustalonych.

Zniekształcenia TIM powstają w wyniku przesterowania pierwszych stopni wzmacniacza na skutek opóźnienia sygnału sprzężenia zwrotnego. (Proces powstawania zniekształceń TIM opisany jest w rozdziale 2). Pomiar dynamicznych zniekształceń intermodulacyjnych nie został jeszcze ujęty w normy, dlatego stosowane jest kilka metod pomiarowych. Wspólną cechą

istniejących metod pomiarowych jest stosowanie sygnału testowego, będącego kompozycją sygnału sinusoidalnego i przebiegu prostokątnego.

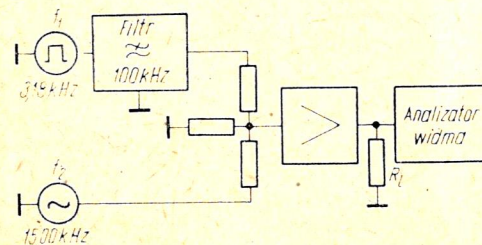
Metoda zaproponowana przez jedną z firm japońskich przedstawiona jest na rys. 1.11. W metodzie tej wykorzystywane są dwa kanały wzmacniacza stereofonicznego. Kanał testowany pobudzany jest sygnałem złożonym z przebiegu prostokątnego i sygnału sinusoidalnego o stosunku amplitud 4:1 i często-



Rys. 1.11. Układ do pomiaru zniekształceń TIM wg metody firmy japońskiej (Lux Corporation of Japan)

ściwościach odpowiednio 500 Hz i 6 kHz. Drugi kanał pobudzany jest odwróconym w fazie przebiegiem prostokątnym, służącym do kompensacji przebiegu prostokątnego będącego częścią składową sygnału testowego. Wydzielony w ten sposób sygnał sinusoidalny podlega pomiarowi zwykłą metodą, służącą do pomiaru współczynnika zniekształceń nieliniowych.

Inna metoda (*Journal of The Audio Engineering Society*, No 4 1977) pozwala na ogólny pomiar zniekształceń intermodulacyjnych za pomocą analizatora widma. Układ pomiarowy przedstawiony jest na rys. 1.12. Podobnie jak w przykładzie poprzednim, sygnał testowy jest kompozycją przebiegu prostokątnego i sygnału sinusoidalnego o stosunku amplitud 4:1.



Rys. 1.12. Układ do pomiaru dynamicznych zniekształceń intermodulacyjnych

Częstotliwości sygnałów wynoszą odpowiednio 3,18 kHz i 15,00 kHz. Całkowity współczynnik zniekształceń intermodulacyjnych jest wyznaczany z zależności:

$$d = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^9 U_{nt}^2}}{U_2} \cdot 100\% \quad (1.5)$$

gdzie U_{nt} jest amplitudą każdego ze składników intermodulacyjnych o częstotliwości $f_2 - nf_1$, a U_2 jest amplitudą sygnału sinusoidalnego.

Każdy ze składników U_{nt} zawiera część dynamiczną, związaną głównie ze zniekształceniami TIM, oraz część statyczną – związaną z nieliniową zależnością wzmocnienia od amplitudy sygnału wejściowego. W celu wyodrębnienia części statycznej przebieg prostokątny należy zamienić na przebieg trójkątny. Testy słuchowe wykazały słyszalność 0,3% TIM.

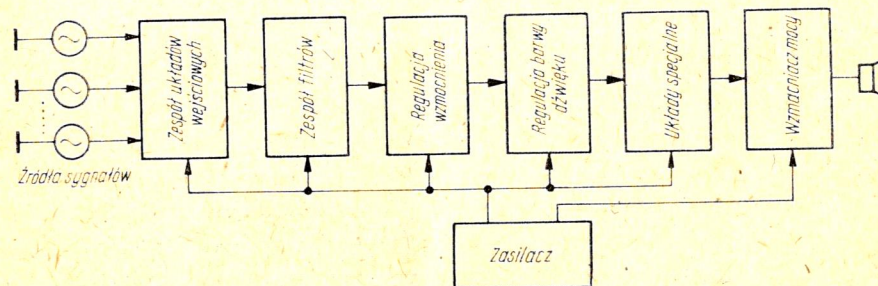
2

ZASTOSOWANIE SPRĘŻENIA ZWROTNEGO W BLOKACH FUNKCJONALNYCH WZMACNIACZY ELEKTROAKUSTYCZNYCH

2.1. Zależności ogólne

Elektroakustyczne wzmacniacze wysokiej klasy charakteryzują się znaczną rozbudową stopni wzmocnienia wstępnego oraz zespołu korektorów, kształtujących charakterystykę częstotliwościową toru.

Podstawowe bloki funkcjonalne wzmacniacza m. cz. przedstawione zostały na rys. 2.1.

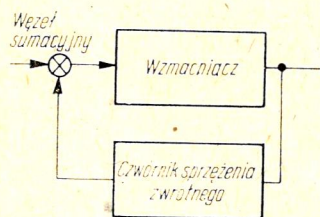


Rys. 2.1. Bloki funkcjonalne wzmacniacza elektroakustycznego wysokiej klasy

Każdy z bloków ma pożądaną charakterystykę częstotliwościową oraz wymagane wzmocnienie napięciowe. Zarówno jedną, jak i drugą cechę korzystnie jest realizować przy zastosowaniu techniki sprzężenia zwrotnego, dzięki czemu uzyskuje się poprawę parametrów eksploatacyjnych.

Działanie sprzężenia zwrotnego polega na przekazywaniu części sygnału z wyjścia układu na jego wejście. Zagadnienia związane z teorią i zastosowaniem sprzężenia zwrotnego zostały szeroko omówione w pracach [2, 3]; w związku z tym ograniczono się tu jedynie do podania niektórych

własności sprzężenia zwrotnego istotnych z punktu widzenia wzmacniaczy elektroakustycznych. Podstawowa struktura układu wzmacniacza objętego pętlą sprzężenia zwrotnego przedstawiona jest na rys. 2.2.



Rys. 2.2. Podstawowa struktura wzmacniacza z pętlą sprzężenia zwrotnego

W zależności od fazy sygnału sprzężenia zwrotnego względem sygnału wejściowego, sprzężenie zwrotne dzieli się na dodatnie (dla faz zgodnych) i ujemne (dla faz przeciwnych). W większości przypadków przez zmianę charakteru sprzężenia zwrotnego zmieniają się krańcowo własności układu objętego tym sprzężeniem.

W układach wzmacniaczy elektroakustycznych stosowane są oba rodzaje sprzężeń, ale szczególne znaczenie ma ujemne sprzężenie zwrotne.

Ogólna zależność określająca wzmocnienie wzmacniacza z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego ma postać:

$$k_f = \frac{k}{1 - \beta k} \quad (2.1)$$

gdzie:

k_f – wzmocnienie wzmacniacza z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego,

k – wzmocnienie wzmacniacza w otwartej pętli,

β – współczynnik sprzężenia zwrotnego, będący stosunkiem sygnału sprzężenia zwrotnego do sygnału wyjściowego.

Wszystkie wielkości występują w formie zespolonej. Dla ujemnego sprzężenia zwrotnego przesunięcie fazy wynosi $\varphi = 180^\circ$ i zależność (2.1) przybiera postać:

$$k_f = \frac{k}{1 + \beta k} \quad (2.2)$$

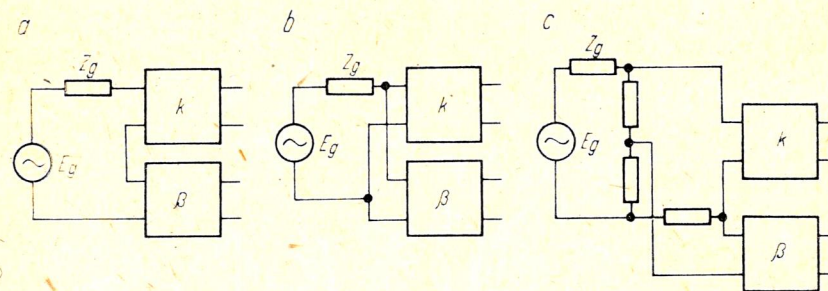
Dla dodatniego sprzężenia zwrotnego przesunięcie fazy $\varphi = 0$ i wzmocnienie wyraża się zależnością:

$$k_f = \frac{k}{1 - \beta k} \quad (2.3)$$

Jak wynika z zależności (2.1) i (2.2), ujemne sprzężenie zwrotne zmniejsza wzmocnienie wzmacniacza $(1 + \beta k)$ razy, natomiast sprzężenie dodatnie powoduje wzrost wzmocnienia, co w przypadku granicznym, gdy $\beta k \rightarrow 1$, może wywołać generację drgań.

Dalszy podział układów ze sprzężeniem zwrotnym przeprowadzony zostanie w zależności od sposobu doprowadzania i odprowadzania sygnału sprzężenia zwrotnego.

Ze względu na sposób doprowadzenia sygnału sprzężenia zwrotnego do obwodu wejściowego, sprzężenie dzieli się na szeregowe, równoległe oraz mieszane (mostkowe). Podstawowe układy przedstawione zostały na rys. 2.3.



Rys. 2.3. Sposoby doprowadzania sygnału sprzężenia zwrotnego do obwodu wejściowego wzmacniacza

a) sprzężenie szeregowe, b) sprzężenie równoległe, c) sprzężenie mieszane (szeregowo-równoległe)

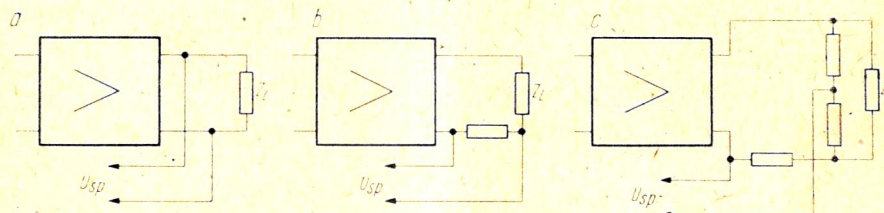
Sposób doprowadzania sygnału sprzężenia zwrotnego oraz jego charakter mają wpływ na impedancję wejściową układu objętego tym sprzężeniem. Na zmianę impedancji wejściowej nie ma natomiast wpływu sposób wyprowadzania sygnału sprzężenia zwrotnego. Podstawowe kierunki zmian impedancji wejściowej zestawione zostały w tabelicy 2.1.

Wpływ sprzężenia zwrotnego na impedancję wejściową wzmacniacza

Tablica 2.1

Rodzaj sprzężenia	Ujemne	Dodatnie
Szeregowe	Z_{we} rośnie	Z_{we} maleje
Równoległe	Z_{we} maleje	Z_{we} rośnie

Ze względu na sposób wyprowadzania sygnału sprzężenia zwrotnego z obwodu wyjściowego wzmacniacza, sprzężenie zwrotne dzieli się na napięciowe, prądowe oraz mieszane. Odpowiednie układy przedstawione zostały na rys. 2.4.



Rys. 2.4. Sposoby wyprowadzania sygnału sprzężenia zwrotnego z obwodu wyjściowego wzmacniacza

a) sprzężenie napięciowe, b) sprzężenie prądowe, c) sprzężenie mieszane (napięciowo-prądowe)

Wpływ sprzężenia zwrotnego na impedancję wyjściową wzmacniacza

Tablica 2.2

Rodzaj sprzężenia	Ujemne	Dodatnie
Napięciowe	Z_{wy} maleje	Z_{wy} rośnie
Prądowe	Z_{wy} rośnie	Z_{wy} maleje

Zależnie od sposobu odprowadzania sygnału sprzężenia zwrotnego oraz od charakteru tego sprzężenia zmienia się impedancja wyjściowa układu objętego tym sprzężeniem.

Na zmianę impedancji wyjściowej nie ma natomiast wpływu sposób doprowadzania sygnału sprzężenia zwrotnego do obwodu wejściowego wzmacniacza. Odpowiednie kierunki zmian impedancji wyjściowej podane zostały w tablicy 2.2.

2.2. Wyznaczanie wzmocnienia napięciowego oraz kształtowanie charakterystyki częstotliwościowej wzmacniacza przy zastosowaniu sprzężenia zwrotnego

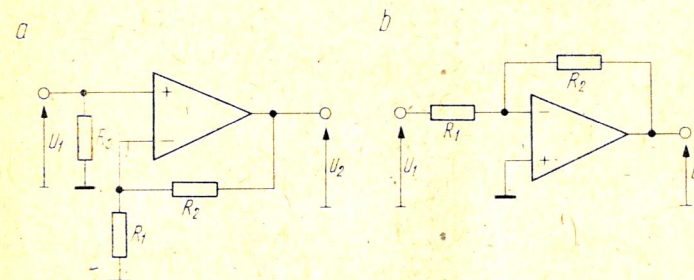
Zgodnie z zależnością (2.2) ujemne sprzężenie zwrotne zmniejsza wzmocnienie napięciowe wzmacniacza $(1 + \beta_u k_u)$ razy.

Analizując bliżej tę zależność łatwo zauważyć, że ze wzrostem wzmocnienia wzmacniacza w otwartej pętli, parametry układu przy pętli zamkniętej zależą przede wszystkim od członu sprzężenia zwrotnego:

$$k_{uf} = \frac{k_u}{1 + \beta_u k_u} = \frac{1}{\frac{1}{k_u} + \beta_u} \xrightarrow{k_u \rightarrow \infty} \frac{1}{\beta_u} \quad (2.4)$$

Jest to bardzo ważna cecha układów ze sprzężeniem zwrotnym, pozwalająca na uzyskiwanie wysokich parametrów użytkowych.

Używany w dalszej części książki trójkątny symbol wzmacniacza, zapożyczony z układów ze wzmacniaczami operacyjnymi, stosowany jest z uwagi na możliwość łatwego wyodrębnienia obwodów sprzężenia zwrotnego. Wejście oznaczone przez „-” odwraca fazę sygnału, natomiast oznaczone przez „+” nie odwraca fazy.



Rys. 2.5. Układy wzmacniaczy z pętlą ujemnego sprzężenia zwrotnego

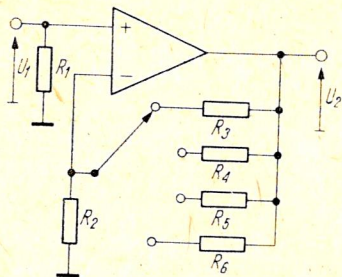
a) sprzężenie napięciowe szeregowe, b) sprzężenie napięciowe równoległe

Dwa podstawowe układy wzmacniaczy objęte pętlą ujemnego sprzężenia zwrotnego przedstawione zostały na rys. 2.5.

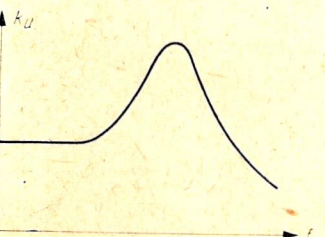
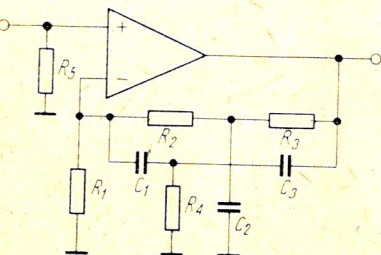
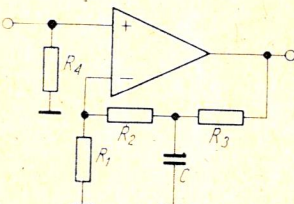
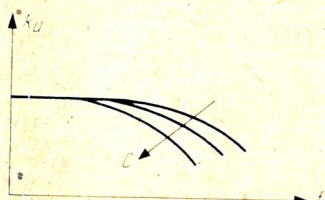
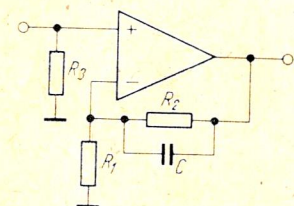
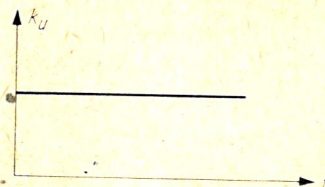
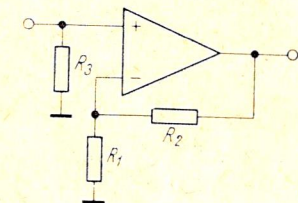
Na rysunku 2.5a przedstawiono wzmacniacz z napięciowym szeregowym sprzężeniem zwrotnym. Sprężenie to podane jest z wyjścia układu przez rezystor R_2 na wejście odwracające fazę sygnału. Przy założeniu, że wzmocnienie napięciowe wzmacniacza w otwartej pętli jest dużo większe od uzyskiwanego w pętli zamkniętej, wzmocnienie napięciowe dla tego przypadku wynosi:

$$k_{uf} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (2.5)$$

Impedancja wejściowa układu równa jest w przybliżeniu wartości rezystancji R_3 .



Rys. 2.6. Wzmacniacz o skokowo regulowanym wzmocnieniu napięciowym



Rys. 2.7. Wpływ członów korekcyjnych na charakterystykę częstotliwościową wzmacniacza. Strzałką oznaczono kierunek wzrostu pojemności C

W przypadku układu z rys. 2.5b wzmocnienie napięciowe wynosi:

$$k_{uf} = \frac{R_2}{R_1} \quad (2.6)$$

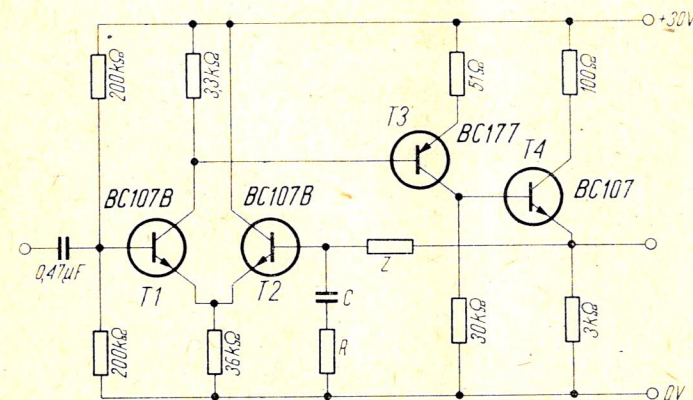
a impedancja wejściowa jest równa w przybliżeniu wartości rezystancji R_1 .

Regulację wzmocnienia napięciowego w obu przypadkach można przeprowadzać, zmieniając wartość jednego z elementów R_1 lub R_2 . Można to robić także skokowo, przełączając odpowiednie wartości elementów, jak przedstawiono na rys. 2.6.

Tego typu rozwiązanie jest szczególnie chętnie stosowane w zespołach obwodów wejściowych wzmacniaczy elektroakustycznych. Technika ujemnego sprzężenia zwrotnego pozwala na bardzo łatwe kształtowanie charakterystyk częstotliwościowych układów; wystarczy w pętlę ujemnego sprzężenia zwrotnego wtrącić odpowiedni człon korekcyjny, aby otrzymać wymaganą zależność wzmocnienia od częstotliwości.

Na rysunku 2.7 zostało podanych kilka przykładów zmian funkcji przenoszenia wzmacniacza w zależności od częstotliwości pobudzenia.

Oczywiście, jak to pokazano na rys. 2.6, możliwe jest przełączanie odpowiednich członów korekcyjnych zależnie od aktualnych potrzeb.



Rys. 2.8. Schemat ideowy wzmacniacza napięciowego o dużym wzmocnieniu w otwartej pętli

Schemat ideowy wzmacniacza o odpowiednio dużym wzmocnieniu, za którego pomocą można otrzymać takie charakterystyki, przedstawiono na rys. 2.8.

Baza tranzystora $T2$ stanowi wejście odwracające fazę sygnału, natomiast baza $T1$ jest wejściem nieodwracającym. W przypadku polaryzacji układu jak na rys. 2.8, impedancja Z musi zapewnić galwaniczne połączenie bazy tranzystora $T2$ z wyjściem układu (emiterem tranzystora $T4$).

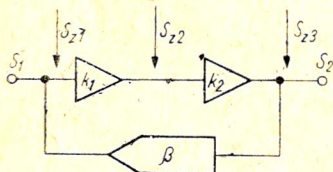
2.3. Wpływ sprzężenia zwrotnego na eliminację zakłóceń i zniekształceń nieliniowych [3, 22]

Wpływ sprzężenia zwrotnego na zakłócenia i zniekształcenia nieliniowe, pojawiające się wewnątrz pętli sprzężenia zwrotnego, rozpatrzony zostanie na przykładzie dwustopniowego wzmacniacza przedstawionego na rys. 2.9.

Zależność wiążąca sygnał wyjściowy S_2 ze wszystkimi sygnałami oddziałującymi na układ jest następująca:

$$S_2 = (S_1 + S_{z1}) \frac{k_1 k_2}{1 - \beta k_1 k_2} + S_{z2} \frac{k_2}{1 - \beta k_1 k_2} + S_{z3} \frac{1}{1 - \beta k_1 k_2} \quad (2.7)$$

Jak wynika z tej zależności, wpływ sprzężenia zwrotnego na zakłócenia jest tym silniejszy, im bliżej wyjścia one powstają. Ujemne sprzężenie zwrotne,



Rys. 2.9. Dwustopniowy wzmacniacz objęty pętlą sprzężenia zwrotnego z uwzględnieniem sygnałów zakłócających

dla którego mianownik każdego ze składników wyrażenia (2.7) ma wartość większą od jedności, spowoduje zmniejszenie oddziaływania sygnałów zakłócających na sygnał wyjściowy.

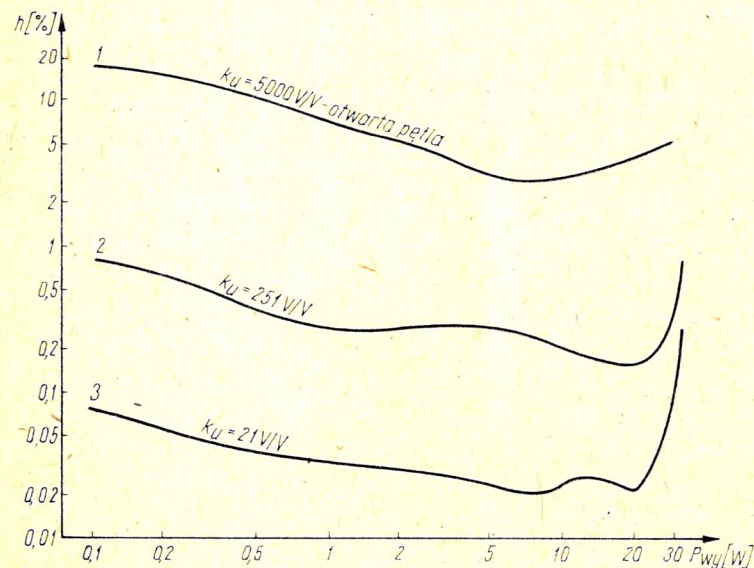
Zależność (2.7) pozostaje także słuszną dla poszczególnych harmonicznych sygnału wejściowego powstałych wewnątrz pętli sprzężenia zwrotnego na skutek istnienia nieliniowości we wzmacniaczu. Ponieważ ujemne sprzężenie zwrotne zmniejsza każdą z wprowadzonych przez wzmacniacz harmonicznych, zmniejszeniu ulega również współczynnik zawartości harmonicznych w stosunku:

$$h_f = \frac{h}{1 + \beta k_1 k_2} \quad (2.8)$$

a więc tyle razy, ile razy zmniejszeniu ulega wzmocnienie wzmacniacza, przy czym rozpatruje się harmoniczne napięciowe w przypadku zastosowania sprzężenia napięciowego, prądowe zaś przy zastosowaniu sprzężenia prądowego. Jest to bardzo korzystna cecha ujemnego sprzężenia zwrotnego, gdyż zmniejszenie wartości współczynnika zawartości harmonicznych należy do pierwszoplanowych zadań przy realizacji wzmacniaczy małej częstotliwości wysokiej klasy.

W zakresie najmniejszych i największych częstotliwości występują we wzmacniaczu znaczne przesunięcia fazowe; w związku z tym wpływ sprzężenia zwrotnego na liniowość dla tego zakresu jest mniejszy niż dla częstotliwości średnich.

Na rysunku 2.10. przedstawiono przykładowe charakterystyki zniekształceń nieliniowych wzmacniacza w funkcji mocy wyjściowej.

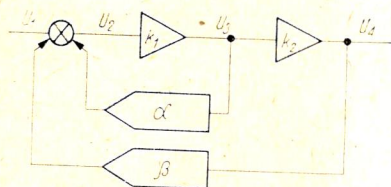


Rys. 2.10. Przebieg charakterystyki zniekształceń nieliniowych w funkcji mocy wyjściowej dla wzmacniacza mocy bez sprzężenia zwrotnego (1) oraz z ujemnym sprzężeniem zwrotnym (2 i 3)

Krzywa 1 przedstawia przebieg zniekształceń nieliniowych w otwartej pętli sprzężenia zwrotnego ($k_u = 5000 \text{ V/V}$, $f = 1 \text{ kHz}$), krzywa 2 przedstawia przebieg zniekształceń nieliniowych po zastosowaniu ujemnego sprzężenia zwrotnego o głębokości 26 dB ($k_u = 251 \text{ V/V}$), natomiast krzywa 3 przedstawia przebieg zniekształceń po zastosowaniu ujemnego sprzężenia zwrotnego

o głębokości 47 dB ($k_u = 21$ V/V). Głębokością ujemnego sprzężenia zwrotnego określa się wyrażoną w dB redukcję wzmacnienia wzmacniacza spowodowaną przez to sprzężenie. Jak widać z przedstawionych krzywych, zniekształcenia ulegają redukcji w przybliżeniu zgodnie z zależnością (2.8)

Jakkolwiek z zależności (2.8) wynika, że wystąpienie sprzężenia dodatniego wpłynie na wzrost zniekształceń układu, istnieje teoria, która kombinacji dodatniego i ujemnego sprzężenia zwrotnego przypisuje niemal całkowitą



Rys. 2.11. Wzmacniacz z pętlą dodatniego i ujemnego sprzężenia zwrotnego

eliminację zniekształceń nieliniowych. Zasady tej teorii podał elektronik amerykański Miller¹⁾. Układ jest przedstawiony na rys. 2.11, a zależność określająca całkowite wzmacnienie układu wynosi:

$$\frac{U_4}{U_1} = \frac{k_1 k_2}{1 - \alpha k_1 - \beta k_1 k_2} \quad (2.9)$$

gdzie:

- k_1 – wzmacnienie wzmacniacza wstępnego,
- k_2 – wzmacnienie wzmacniacza końcowego,
- α – współczynnik sprzężenia dodatniego,
- β – współczynnik sprzężenia ujemnego.

Przy doborze sprzężenia zwrotnego dodatniego takim, że:

$$1 - \alpha k_1 = 0 \quad (2.10)$$

zależność określająca wzmacnienie całkowite układu przybiera postać:

$$U_4/U_1 = -1/\beta \quad (2.11)$$

a więc wzmacnienie całego układu nie zależy od wzmacnienia k_2 i wzmacniacz pozbawiony zostaje zniekształceń.

Oczywiście w warunkach rzeczywistych równość (2.10) nie daje się dokładnie zrealizować; występuje poza tym niebezpieczeństwo niestabilności układu (zakres częstotliwości działania sprzężenia dodatniego powinien być

węższy od zakresu sprzężenia ujemnego), mimo to redukcja zniekształceń nieliniowych może być znaczna.

Ujemne sprzężenie zwrotne, które ma niekwestionowany wpływ na zmniejszenie zniekształceń nieliniowych, może być jednak źródłem zniekształceń innego typu, określanых skrótem TIM, tj. zniekształceń intermodulacyjnych w stanach nieustalonych, które są jedną z form dynamicznych zniekształceń intermodulacyjnych.

Bezpośrednim powodem, dla którego rozpoczęto badanie zjawiska zniekształceń typu TIM, były różnice w brzmieniu pomiędzy wzmacniaczami lampowymi a wzmacniaczami tranzystorowymi. W wyniku wielu przeprowadzonych testów słuchowych bardzo dobre wzmacniacze tranzystorowe nie wytrzymywały konkurencji z dobrymi wzmacniaczami lampowymi. Pojawiało się nawet określenie „tranzystorowy dźwięk”, co miało znamionować dźwięk o odcieniu „metalicznym”, w odróżnieniu od „ciepłego” dźwięku wzmacniaczy lampowych. Z drugiej strony było wiadomo, że wzmacniacze lampowe nie szczyliły się nigdy zbyt małym współczynnikiem zniekształceń nieliniowych i intermodulacyjnych. Zjawisko było tym bardziej interesujące, że dwa wzmacniacze tranzystorowe o identycznych parametrach, jak: pasmo przenoszenia, współczynnik zniekształceń nieliniowych i intermodulacyjnych miały różne brzmienie. Stało się więc oczywiste, że nie wszystkie parametry wzmacniacza były mierzone.

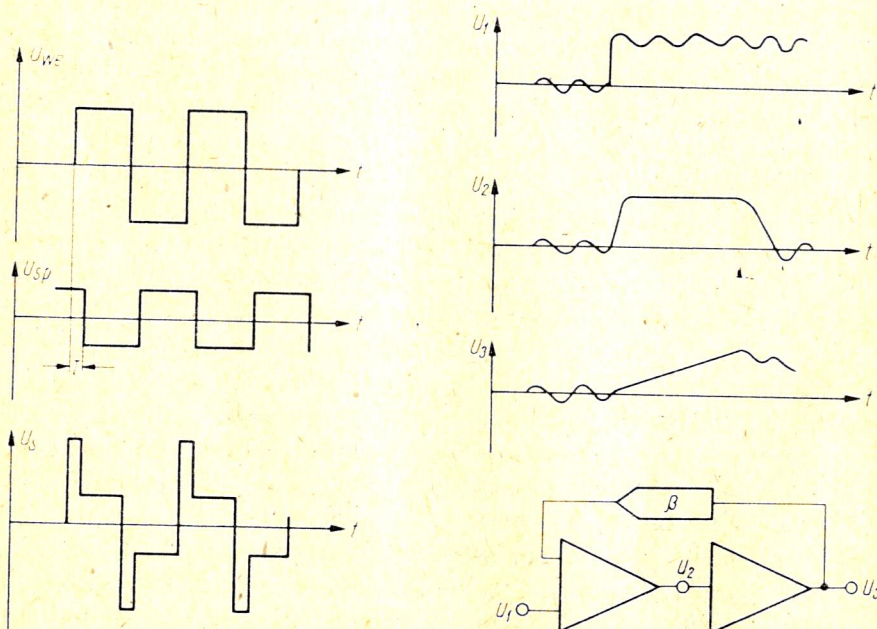
Sprawę wyjaśnił Matti Otała (Finlandia) publikując artykuł o zniekształceniach typu TIM (*Journal of The Audio Engineering Society*, Vol 20, No 5), które okazały się odpowiedzialne za powyższe zjawiska. Powstało jednak pytanie, dlaczego są one niesłyszalne we wzmacniaczach lampowych. Przyczyna tkwiła w głębokości ujemnego sprzężenia zwrotnego. Transformator znajdujący się na wyjściu wzmacniaczy lampowych nie pozwalał na wprowadzanie bardzo głębokiego ujemnego sprzężenia zwrotnego, które na ogół nie przekraczało 20 dB. Inaczej sprawa wyglądała we wzmacniaczach tranzystorowych. Tutaj sprzężenie osiągało głębokość 40 ÷ 60 dB. Początkowo było to związane ze stosunkowo niewielką częstotliwością graniczną tranzystorów mocy i zastosowanie silnego sprzężenia zwrotnego pozwalało na rozszerzenie pasma przenoszenia wzmacniacza poza zakres akustyczny.

W późniejszym okresie zastosowanie silnego ujemnego sprzężenia zwrotnego umożliwiało zmniejszenie współczynnika zniekształceń nieliniowych i intermodulacyjnych do niemal niemierzalnych wartości. Jednak sygnał sprzężenia zwrotnego jest podporządkowany pewnemu skończonemu czasowi opóźnienia, którego przyczyną są składniki reaktancyjne i czas przejścia wzmacniających elementów, tak że sygnał sprzężenia zwrotnego przybywa do

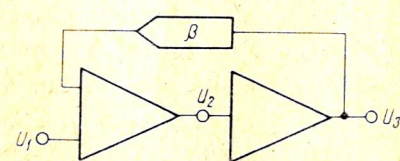
¹⁾ Combining positiv and negativ feedback – Electronics III 1950 r.

wejścia nieco opóźniony w czasie. Opóźnienie sygnału sprzężenia zwrotnego w czasie nie stanowi problemu, gdy do wejścia doprowadzony jest czysty sygnał sinusoidalny. Spowodowane jest to tym, że wypadkowa dwóch sinusoid przesuniętych względem siebie w czasie jest również czystą sinusoidą. Sprzężenie nie w pełni wywiązuje się ze swoich zadań, ale nie wprowadza to nowych form zniekształceń poza tymi, które są w sygnale wejściowym. Z tego względu badanie wzmacniacza czystym przebiegiem sinusoidalnym nie prowadzi do wykrycia zniekształceń TIM.

Inaczej sprawa się będzie miała, gdy do wejścia wzmacniacza zostanie doprowadzony przebieg prostokątny lub skok jednostkowy, co bardziej odpowiada rzeczywistym sygnałom muzycznym. Przebieg zjawiska przedstawiony jest poglądowo na rys. 2.12. Wypadkowa dwóch przebiegów prostokątnych przesuniętych w czasie jest przebiegiem odkształconym, niepodobnym do przebiegów pierwotnych. Krótkie impulsy występujące na początku przebiegu powodują w efekcie stan przeciążenia i powstanie zniekształceń TIM.



Rys. 2.12. Powstawanie zniekształceń TIM wskutek zmiany kształtu przebiegu sterującego (U_s) wywołanego opóźnieniem napięcia ujemnego sprzężenia zwrotnego U_{sp}



Rys. 2.13. Reakcja wzmacniacza z pętlą ujemnego sprzężenia zwrotnego na pobudzenie przebiegiem składającym się z fali sinusoidalnej i skoku jednostkowego

Jest rzeczą zrozumiałą, że stan przeciążenia wystąpi tym ostrzej, im większa jest głębokość sprzężenia zwrotnego. W układach rzeczywistych pasmo przenoszenia wzmacniacza w otwartej pętli staje się więc sprawą pierwszoplanową. Zniekształcenia TIM pojawiają się wówczas, gdy sygnał wejściowy ma wystarczającą amplitudę oraz składniki częstotliwościowe o częstotliwości większej niż częstotliwość graniczna wzmacniacza w otwartej pętli. W wewnętrznej pętli sprzężenia zwrotnego powstają wówczas przebiegi, których wartość może być kilka tysięcy razy większa od nominalnej wartości tego napięcia. Konsekwencją takiego stanu rzeczy będzie ich obcinanie w pierwszych stopniach wzmacniacza, ponieważ zwykle nie będzie istniał odpowiedni margines przebieżalności.

Fizyczne zniekształcenia TIM są wynikiem zbyt wolnej pętli sprzężenia zwrotnego, która nie działa podczas narastania sygnału. W tej sytuacji pierwsze stopnie wzmacniacza pracują jakby w otwartej pętli ulegając silnemu przesterowaniu.

Podstawową sprawą jest więc zapewnienie odpowiedniej szybkości zmian napięcia na wyjściu wzmacniacza, co liczbowo określa parametr SR , zwany współczynnikiem szybkości zmian (ang. *slew-rate*), wyrażany w $V/\mu s$. Ograniczenie wartości tego parametru jest rezultatem skończonej wartości prądu ładującego wewnętrzne pojemności w różnych węzłach wewnątrz wzmacniacza.

Maksymalna szybkość zmian napięcia wyjściowego określa więc maksymalną częstotliwość, przy której można otrzymać na wyjściu wzmacniacza nieznkształcony przebieg sinusoidalny o amplitudzie odpowiadającej pełnemu zakresowi zmian napięcia wyjściowego.

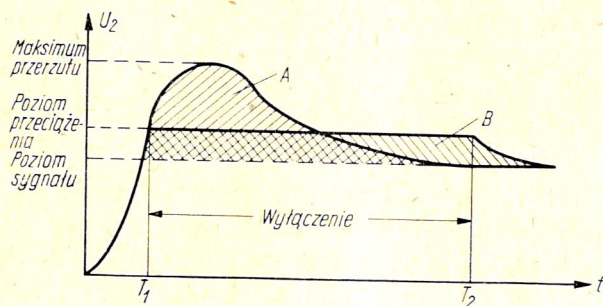
Szybkość zmian napięcia wyjściowego jest związana z amplitudą A sygnału sinusoidalnego o danej częstotliwości f następującą zależnością:

$$SR = A 2\pi f 10^{-6} \text{ [V}/\mu s\text{]} \quad (2.12)$$

Wysterowując wzmacniacz przebiegiem sinusoidalnym powyżej jego granicznej szybkości narastania otrzymujemy przebieg wyjściowy o kształcie trójkątnym, który maleje przy zwiększaniu częstotliwości [4].

Na rysunku 2.13 przedstawiono reakcję wzmacniacza z pętlą ujemnego sprzężenia zwrotnego na pobudzenie przebiegiem składającym się z fali sinusoidalnej i skoku jednostkowego. Przebiegi w układzie wywołują stan przeciążenia wzmacniacza, co może być przyczyną powstania 100% zniekształceń intermodulacyjnych. Całkowity mechanizm pętli sprzężenia zwrotnego podczas przeciążenia ma tendencję do utrzymywania tego stanu o wiele dłużej niż wynosi czas narastania odpowiedzi wzmacniacza w otwartej pętli.

Stała czasu wzmacniacza musi być niezależna od tego, czy wejściowe stopnie są przeciążone, czy nie. Obszary oznaczone *A* i *B* na rys. 2.14 muszą być równe. W niekorzystnym przypadku przeciążenie może trwać kilka milisekund i może być powodowane przez sygnały o amplitudzie znacznie mniejszej niż nominalna.



Rys. 2.14. Mechanizm całkujący pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego podczas przeciążenia

Zniekształcenia tego typu wzrastają wraz z głębokością ujemnego sprzężenia zwrotnego zupełnie odwrotnie do zniekształceń nieliniowych i intermodulacyjnych, które wówczas maleją. Z tego względu głębokość ujemnego sprzężenia zwrotnego zastosowana we wzmacniaczu musi być wynikiem kompromisu pomiędzy dążeniem do uzyskania możliwie małych zniekształceń nieliniowych a dążeniem do uniknięcia zniekształceń TIM.

Metody przeciwdziałania pojawianiu się zniekształceń TIM podane są w rozdziale 3.