



AKADEMIA MORSKA W SZCZECINIE

JEDNOSTKA ORGANIZACYJNA:
ZAKŁAD KOMUNIKACYJNYCH TECHNOLOGII MORSKICH

INSTRUKCJA

ELEKTROTECHNIKA I ELEKTRONIKA

Laboratorium

Ćwiczenie nr 8: Wzmacniacze

Opracował:	dr inż. Marcin Mąka, dr inż. Piotr Majzner
Zatwierdził:	dr inż. Piotr Majzner
Obowiązuje od: 24. IX 2012	

Spis treści

8.1. Cel i zakres ćwiczenia

8.2. Opis stanowiska laboratoryjnego

8.3. Przebieg ćwiczenia

8.4. Warunki zaliczenia

8.5. Część teoretyczna

8.6. Literatura

8.7. Efekty kształcenia

8. WZMACNIACZE

8.1. Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest opanowanie wiedzy z zakresu budowy, parametrów, charakterystyk i zastosowania podstawowych układów wzmacniających.

Zagadnienia

1. Pojęcie wzmacniacza.
2. Klasyfikacja wzmacniaczy.
3. Parametry wzmacniaczy.
4. Charakterystyki wzmacniaczy.
5. Wzmacniacze mocy.
6. Wzmacniacze selektywne.
7. Wpływ ujemnego sprzężenia zwrotnego na pracę wzmacniacza.

Pytania kontrolne.

1. Wyjaśnij, jakie urządzenie nazywamy wzmacniaczem ?
2. Podaj klasyfikację wzmacniaczy ze względu na różne przyjęte kryteria.
3. Podaj podstawowe parametry wzmacniaczy.
4. Narysuj i scharakteryzuj schemat zastępczy układu wzmacniającego.
5. Scharakteryzuj i opisz poszczególne parametry wzmacniaczy.
 - wzmocnienia,
 - sprawność
 - impedancje wejściowe i wyjściowe
 - parametry znamionowe
 - pasmo przenoszenia
 - zakres dynamicznej pracy
6. Wymień i scharakteryzuj charakterystyki wzmacniaczy.
7. Opisz dokładnie charakterystyki częstotliwościowe wzmacniaczy.
8. Scharakteryzuj charakterystykę dynamiczną (przejściową) wzmacniacza.
9. Opisz zniekształcenia liniowe wzmacniacza.
10. Opisz zniekształcenia nieliniowe wzmacniacza.
11. Opisz wzmacniacze wielostopniowe.
12. Scharakteryzuj wzmacniacze mocy
13. Scharakteryzuj wzmacniacze selektywne (strojone, rezonansowe).
14. Co to jest sprzężenie zwrotne ? Podaj podstawowe zależności.
15. Co to jest dodatnie sprzężenie zwrotne (DSZ) ?
16. Co to jest ujemne sprzężenie zwrotne (USZ) ?
17. W jakim celu stosuje się USZ ?
18. Podaj klasyfikację USZ.
19. Wyjaśnij wpływ USZ na parametry wzmacniacza.

8.2. Opis układu pomiarowego.

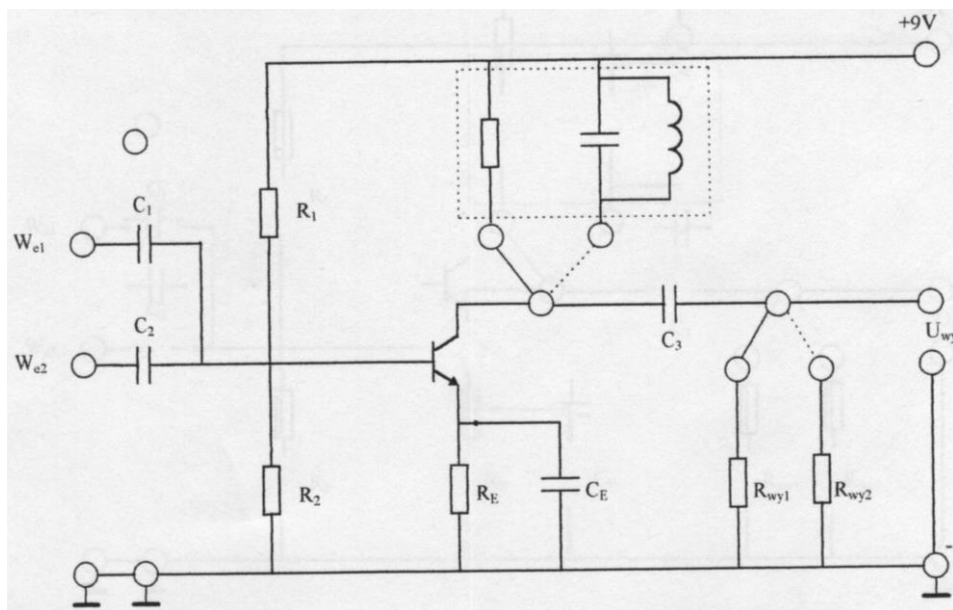
Zestaw przyrządów :

- a. układ badany;
- b. oscyloskop dwukanałowy,
- c. zasilacz 9V,

d. generator przebiegów sinusoidalnych;

Opis układu badanego.

Układ składa się z jednej płytki zasilanej napięciem stałym 9V. Zawiera typowy najprostszy wzmacniacz jednostopniowy zbudowany na tranzystorze T . Sygnał wejściowy z generatora podaje się na jedno z wejść W_{e1} lub W_{e2} . Oba wejścia różnią się tylko pojemnością sprzęgającą (kondensatory C_1 i C_2). Wyjście sygnału wzmacnionego obserwuje się za pomocą oscyloskopu z gniazd Wy. Wzmacniacz może pracować jako wzmacniacz szerokopasmowy - wtedy jako obciążenie kolektora występuje rezystancja R , lub jako wzmacniacz rezonansowy - wtedy w obwodzie kolektora występuje układ rezonansowy LC . Sygnał wyjściowy zdejmowany jest z kolektora tranzystora poprzez pojemność sprzęgającą C_3 . Możliwe jest obserwowanie sygnału wzmacnionego bez dołączania rezystancji wyjściowej (R_{wy1} i R_{wy2} odłączone) lub z dołączeniem rezystancji wyjściowej. Mogą one na przykład reprezentować rezystancje wejściową dołączonego do wzmacniacza innego urządzenia lub rezystancje wejściową kolejnego stopnia wzmacniającego



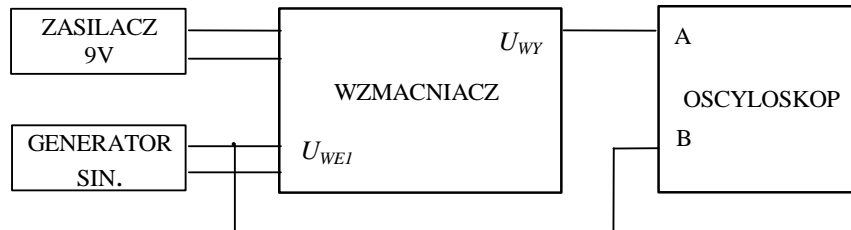
Rys. 8.2.1. Schemat układu badanego.

8.3. Wykonanie ćwiczenia

Do układu badanego dołączyć napięcie zasilania 9V (tylko za zgodą prowadzącego).

8.3.1. Badanie charakterystyki przejściowej (dynamicznej) wzmacniacza $U_{wy} = f(U_{we})$

Wzmacniacz przełączyć na wzmacniacz szerokopasmowy (obciążenie rezystancyjne kolektora). Połączyć układ jak na rys. 8.3.1.



Rys. 8.3.1. Schemat połączeń do badania charakterystyki przejściowej.

Ustawić na generatorze:

$$f = 10 \text{ kHz.}$$

Napięcie z generatora podłączyć do gniazd W_{weI} , odłączyć ewentualne podłączone obciążenia - R_1 i R_2 . Zdjąć charakterystykę przejściową (dynamiczną) wzmacniacza $U_{wy} = f(U_{we})$ ustawiając na oscyloskopie amplitudę napięcia wejściowego - U_{we} od 50 mV co 50 mV:

$$U_{we} = \{50, 100, 150, \dots\} \text{ [mV]}$$

mierząc amplitudę napięcia wyjściowego - U_{wy} na drugim kanale oscyloskopu.

Uwaga: w generatorach DM3051 ustawianą wielkością jest wartość międzyszczytowa - U_{p-p} zamiast amplitudy - U_o . Stąd ustawiana na generatorze wielkość napięcia musi być 2 razy większa od wymaganej w karcie pomiarowej.

Obserwując kształt napięcia wyjściowego określić przy jakiej amplitudzie napięcia wejściowego wystąpiły wyraźne zniekształcenia sygnału na wyjściu..

8.3.2. Wyznaczanie charakterystyk amplitudowej i fazowej wzmacniacza szerokopasmowego dla różnych pojemności sprzęgających

Odłączyć ewentualne podłączone obciążenia - R_1 i R_2 . Ustawić amplitudę napięcia wejściowego:

$$U_{we} = 100 \text{ mV}$$

- a. Generator przebiegu sinusoidalnego podłączyć do wzmacniacza przez pojemność sprzęgającą:

$$C_1 = 0.1 \text{ }\mu\text{F (gniazda We1)}$$

Zdjąć charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową wzmacniacza $U_{wy} = f(f)$ mierząc amplitudę napięcia na wyjściu - U_{wy} oraz charakterystykę fazową wzmacniacza mierząc przesunięcie fazowe $\phi = f(f)$ między przebiegiem wejściowym a wyjściowym, zmieniając częstotliwość f od 10 Hz do 100 kHz:

$$f = \{10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, \dots, 100\,000\} \text{ [Hz]}$$

- b. Generator przebiegu sinusoidalnego podłączyć do wzmacniacza przez pojemność sprzęgającą:

$$C_2 = 0.01 \text{ }\mu\text{F (gniazda We2)}$$

Zdjąć charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową wzmacniacza $U_{wy} = f(f)$ mierząc amplitudę napięcia na wyjściu - U_{wy} oraz charakterystykę fazową wzmacniacza mierząc przesunięcie fazowe $\phi = f(f)$ między przebiegiem wejściowym a wyjściowym, zmieniając częstotliwość f od 10 Hz do 100 kHz:

$$f = \{10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, \dots, 100\,000\} \text{ [Hz]}$$

8.3.3. Wyznaczanie charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowej wzmacniacza rezonansowego (selektywnego, wąskopasmowego) dla różnych rezystancji wyjściowych

Wzmacniacz przełączyć na wzmacniacz rezonansowy (obciążenie LC kolektora). Generator przebiegu sinusoidalnego podłączyć do wzmacniacza przez pojemność sprzęgającą $C_l = 0.1 \mu\text{F}$ (gniazda We1). Ustawić amplitudę napięcia wejściowego:

$$U_{we} = 10 \text{ mV}$$

Zdjąć charakterystykę częstotliwościową wzmacniacza rezonansowego $U_{wy} = f(f)$ mierząc amplitudę napięcia na wyjściu U_{wy} zmieniając częstotliwość f w zakresie od 12 do 28 kHz co 1 kHz:

$$f = \{12, 13, \dots, 28\} \text{ [kHz]}$$

dla trzech różnych rezystancji wyjściowych R_{wy} :

- $R_{wy} = \infty$ (kabel obciążenia odłączony)
- $R_{wy} = 620 \text{ k}\Omega$
- $R_{wy} = 110 \text{ k}\Omega$

Uwaga: dla raz ustawionej częstotliwości pomierzyć trzy napięcia dla trzech różnych rezystancji wyjściowych

8.4. Warunki zaliczenia ćwiczenia

Warunkiem zaliczenia ćwiczenia jest:

- napisanie z wynikiem pozytywnym krótkiego sprawdzianu na początku zajęć;
- wykonanie ćwiczenia;
- sporządzenie sprawozdania według instrukcji zawartej poniżej;
- obrona sprawozdania na następnych zajęciach;
- potwierdzenie opanowania zakresu ćwiczenia na ostatnich zajęciach zaliczeniowych;

W sprawozdaniu należy zamieścić:

- kartę pomiarową;
- charakterystykę przejściową wzmacniacza;
- określenie wzmocnienia wzmacniacza dla liniowej części charakterystyki przejściowej;
- opisanie charakteru zniekształceń występujących dla zbyt dużego sygnału wejściowego wraz z wyjaśnieniem powodów ich występowania;
- charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe częstotliwościowe wzmacniacza szerokopasmowego (na jednym wykresie) dla dwóch różnych pojemności sprzęgających, z osią częstotliwości narysowaną w skali logarytmicznej;
- charakterystyki fazowo-częstotliwościowe częstotliwościowe wzmacniacza szerokopasmowego (na jednym wykresie) dla dwóch różnych pojemności sprzęgających, z osią częstotliwości narysowaną w skali logarytmicznej;
- określenie pasma przenoszenia wzmacniacza szerokopasmowego (zaznaczyć na wykresie) dla dwóch różnych pojemności sprzęgających;

- określenie wzmocnienia w paśmie przenoszenia wzmacniacza szerokopasmowego dla dwóch różnych pojemności sprzęgających;
- wyjaśnienie, jak wpływa pojemność sprzęgająca na pasmo przenoszenia i kształt charakterystyki częstotliwościowej wzmacniacza szerokopasmowego;
- charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe wzmacniacza rezonansowego dla różnych rezystancji obciążenia (na jednym wykresie);
- określenie pasma przenoszenia dla wzmacniacza rezonansowego dla różnych rezystancji obciążenia (zaznaczyć na wykresie);
- określenie wzmocnienia dla częstotliwości rezonansowej wzmacniacza rezonansowego dla różnych rezystancji obciążenia;
- wyjaśnienie dlaczego dołączenie rezystancji obciążenia pogarsza charakterystykę wzmacniacza rezonansowego;
- własne wnioski i spostrzeżenia.

Wskazówki do sprawozdania:

Pasma przenoszenia B dowolnej charakterystyki określamy jako różnicę częstotliwości granicznej górnej f_g i częstotliwości granicznej dolnej f_d .

$$B = f_g - f_d$$

Częstotliwość graniczną dolną i górną pasma przenoszenia określa się jako częstotliwości przy której poziom sygnału wyjściowego jest mniejszy od maksymalnego sygnału wyjściowego o -3dB lub inaczej jeżeli poziom sygnału wyjściowego jest mniejszy o ok. 0.707 maksymalnego sygnału wyjściowego

$$\frac{U_{WYMAX}}{U_{WY}(f_d)} = \frac{U_{WYMAX}}{U_{WY}(f_g)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0.707$$

Wzmocnienie dowolnej charakterystyki można określić jako stosunek maksymalnego sygnału wyjściowego do sygnału wejściowego

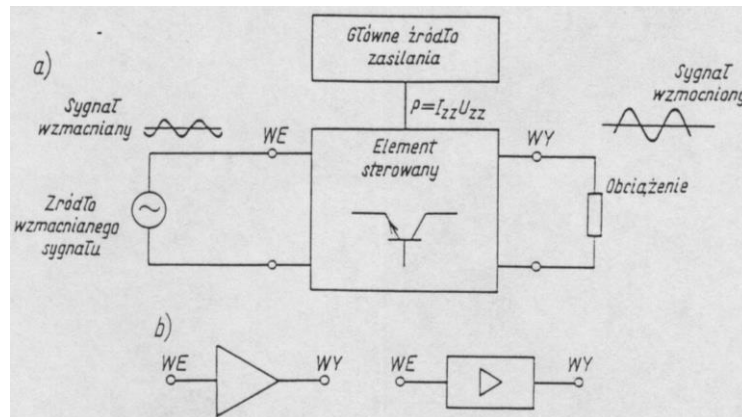
$$k_u = \frac{U_{WYMAX}}{U_{WE}} \quad \left[\frac{V}{V} \right]$$

Często wzmocnienie wyraża się w decybelach, wtedy wzór na wzmocnienie wygląda następująco:

$$k_u = 20 \log \frac{U_{WYMAX}}{U_{WE}} \quad [dB]$$

8.5.1. Definicja wzmacniacza.

Wzmacniaczem nazywamy układ, w którym kosztem niewielkiej energii elektrycznej można sterować większą energią dostarczoną ze źródła zasilania do odbiornika, czyli wzmacniać sterujący sygnał elektryczny. Inaczej można powiedzieć, że wzmacniaczem jest urządzeniem, w którym energia ze źródła zasilania jest zamieniana na energię sygnału wyjściowego w sposób zależny od wejściowego sygnału sterującego. Wzmacniacz musi więc posiadać czynny element sterujący taki jak lampy – trioda lub pentoda, czy też tranzystory - bipolarny lub unipolarny. Element czynny steruje przepływem energii ze źródła zasilania do obciążenia. Wzmacniacz posiada obwód wejściowy (wejście), do którego dostarczony jest sygnał sterujący (wzmacniany), posiada obwód wyjściowy (wyjście), do którego dołącza się odbiornik wzmocnionego sygnału (obciążenie) – rys. 8.5.1.



Rys. 8.5.1. Schemat blokowy wzmacniacza i jego symbole graficzne

Niezbędnym elementem zapewniającym pracę wzmacniacza jest źródło zasilania. We wzmacniaczu zwiększana jest moc sygnału wejściowego czyli iloczyn $P=UI$. Można to osiągnąć przez zwiększenie tylko jednego z czynników tego iloczynu, a więc wzmocnienie prądu I lub napięcia U .

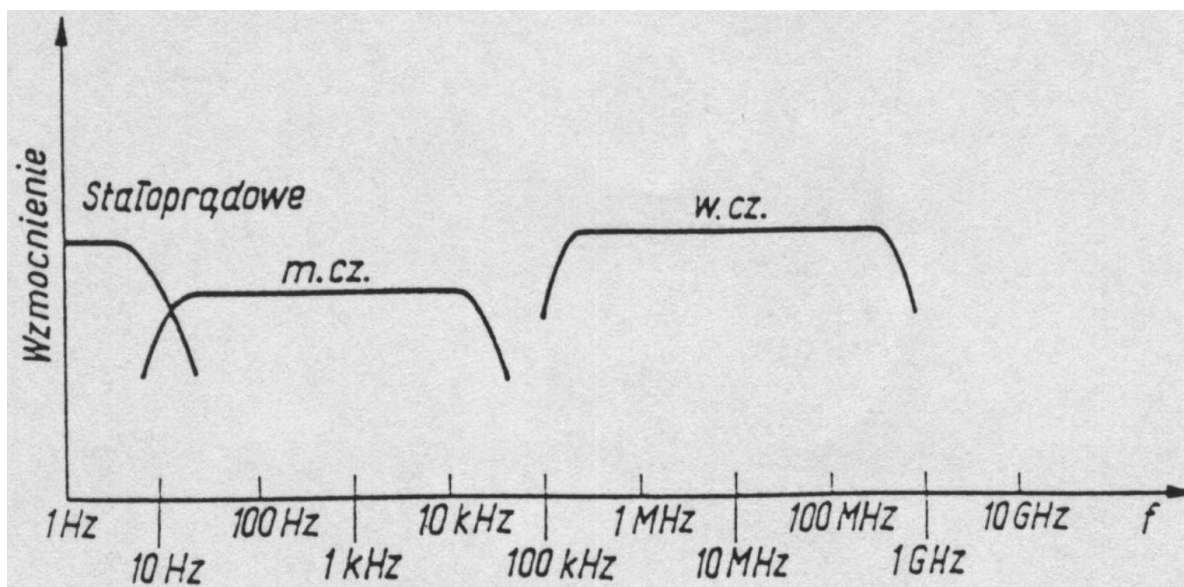
8.5.2. Klasyfikacja wzmacniaczy

W zależności od typu wzmacnianej wielkości elektrycznej rozróżniamy wzmacniacze *prądowe* – wzmacniacz na wyjściu wzmacnia prąd wejściowy, *napięciowe* – wzmacniacz wzmacnia sygnał napięciowy i najczęściej stosowane wzmacniacze *mocy* - na wyjściu wzmacniacza uzyskuje się odpowiednio wzmocnioną moc sygnału wejściowego.

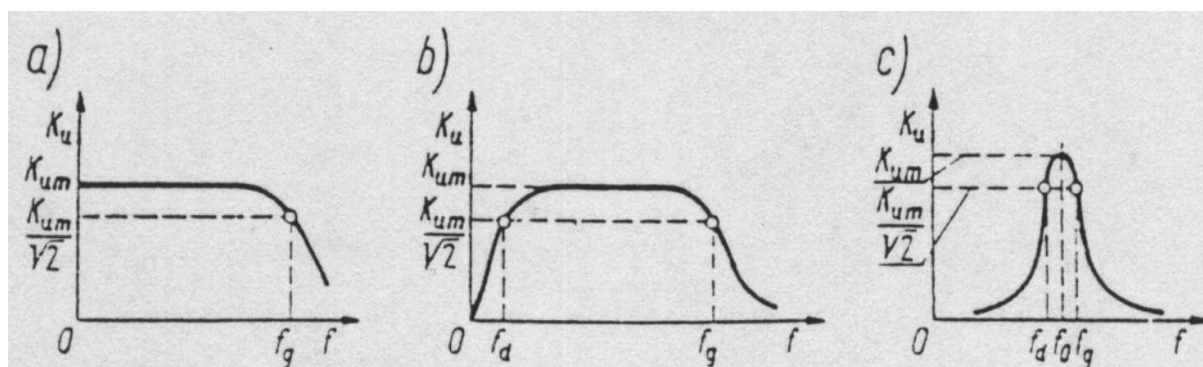
W zależności od zastosowanego elementu sterowanego wzmacniacze dzielimy na *tranzystorowe* oraz *lampowe* stosowane dawniej, obecnie prawie nie spotykane.

Przyjmując jako kryterium podział zakresu częstotliwości wzmacnianych sygnałów rozróżnia się wzmacniacze *prądu stałego* (wzmacniają prąd stały i sygnały od częstotliwości zerowej) do określonej częstotliwości górnej granicznej, wzmacniacze *małej częstotliwości* (m.cz.) i wzmacniacze *wielkiej częstotliwości* (w.cz.) – rys. 8.5.2.

W elektronice ważną cechą wzmacniaczy jest ich zdolność do wzmocnienia tylko sygnałów o częstotliwościach leżących w wąskim przedziale, na ogół wokół pewnej częstotliwości środkowej (stosunek granicznej częstotliwości górnej f_g do dolnej f_d jest bliski jedności). Wzmocnienie tych wzmacniaczy raptownie maleje zarówno dla częstotliwości mniejszych, jak i większych od częstotliwości środkowej f_o . Wzmacniacze takie nazywamy *selektywnymi* (często rezonansowymi). Inny typ wzmacniaczy umożliwia wzmacnianie sygnałów w maksymalnie szerokim przedziale częstotliwości (duża wartość stosunku częstotliwości granicznej górnej f_g do dolnej f_d w praktyce powyżej 10). Wzmacniacze takie nazywamy wzmacniaczami *szerekopasmowymi*.



Rys. 8.5.2. Klasyfikacja wzmacniaczy ze względu na zakres wzmacnianych częstotliwości

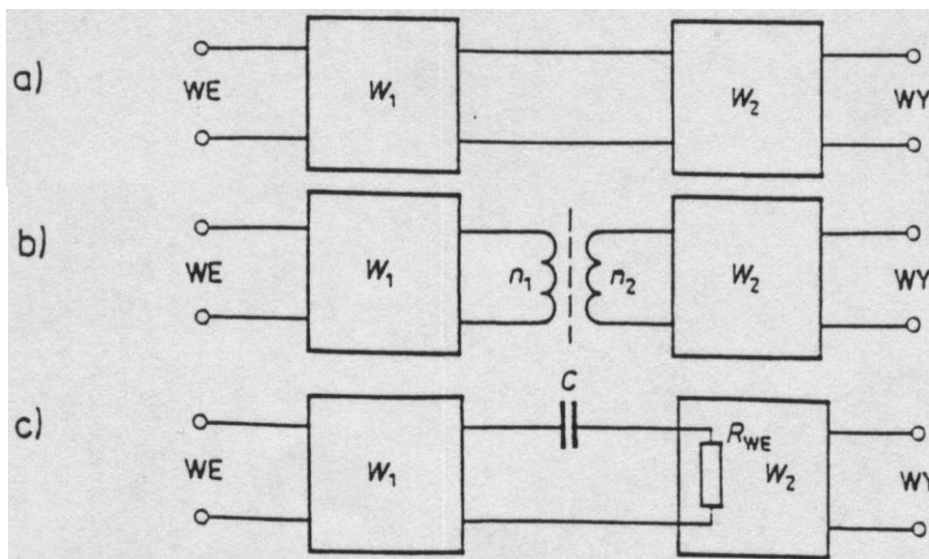


Rys. 8.5.3. Charakterystyki amplitudowe wzmacniaczy a) prądu stałego b) szerokopasmowego c) selektywnego

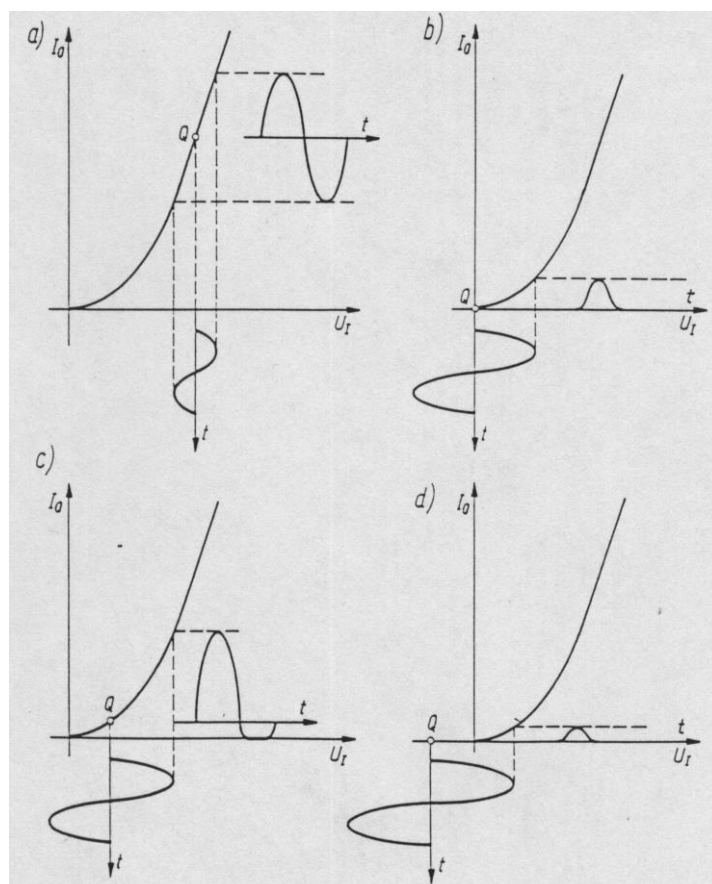
Ze względu na rodzaj zastosowanego sprzężenia między wzmacniaczem a obciążeniem (odbiornikiem, ang: *load*) lub a następnym stopniem wzmacniającym rozróżnia się wzmacniacze o sprzężeniu *pojemnościowym* (*RC*), *transformatorowym* lub *bezpośrednim* (galwanicznym). We Wzmacniaczach o sprzężeniu *RC* i transformatorowym wzmacniane są wyłącznie sygnały zmienne, gdyż dzięki elementom sprzęgającym napięcie stałe z wyjścia stopnia poprzedniego lub źródła sygnału nie przedostaje się na wejście stopnia następnego (lub obciążenia). Sprzężenia takie stosuje się między innymi we wzmacniaczach akustycznych. We wzmacniaczach o sprzężeniach bezpośrednich wzmacniane są sygnały stałe jak i zmienne. Sprzężenia takie stosowane są na przykład we wzmacniaczach prądu stałego.

Wzmacniacze klasyfikuje się także w zależności od położenia spoczynkowego punktu pracy na charakterystyce roboczej elementu sterowanego oraz amplitudy sygnału wejściowego. Rozróżnia się wzmacniacze *klasy A*, *B*, *AB*, i *C*. We wzmacniaczach klasy *A* spoczynkowy punkt pracy jest wybierany na liniowej części charakterystyki roboczej elementu sterowanego (np. tranzystora), a amplituda sygnału wejściowego jest na tyle mała, że przez cały okres sygnału wejściowego element sterowany przewodzi prąd (pracuje w zakresie aktywnym). Jeżeli punkt pracy jest wybrany tak, że element sterowany przewodzi prąd tylko przez połowę okresu (przez drugą połowę okresu jest zatkany), to wzmacniacz pracuje w klasie *B*. W klasie *AB* element sterowany przewodzi przez większą część okresu sygnału wejściowego. W klasie *C* element sterowany przewodzi przez mniejszą część okresu sygnału wejściowego. W klasie *A* budowane są wzmacniacze napięciowe, zarówno

małej jak i wielkiej częstotliwości. W klasie B buduje się szerokopasmowe wzmacniacze mocy a w klasie C wzmacniacze mocy selektywne.



Rys. 8.5.4 Wzmacniacze ze sprzężeniami: a) bezpośrednim; b) transformatorowym c) pojemnościowym RC



Rys 8.5.5. Charakterystyki wzmacniaczy prądu wyjściowego I_o w funkcji napięcia sterującego U_i ze względu na położenie punktu pracy Q roboczej części elementu sterowanego dla klasy a) A; b) B; c) AB; d) C

Wzmacniacze klasy A charakteryzują się najprostszą budową, składają się na ogół z jednego elementu czynnego czyli najczęściej z jednego tranzystora. Cechują się także najmniejszą sprawnością energetyczną, gdyż nawet w przypadku braku sygnału sterującego (położenie punktu Q

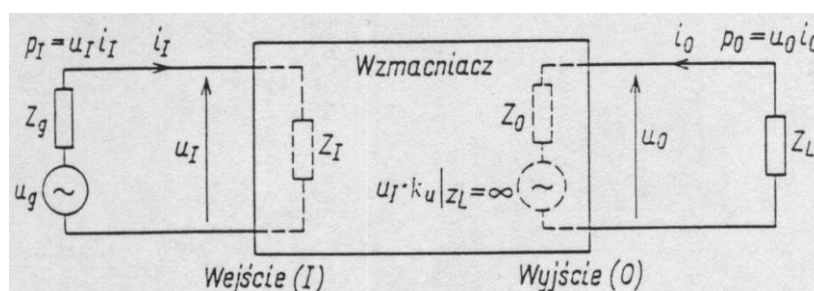
na charakterystyce) przez element czynny płynie prąd. Wzmacniacze klasy B składają się na ogół z dwóch elementów czynnych, z których każdy przewodzi jedna połowę okresu sygnału wzmacnionego. Wzmacniacz ten charakteryzuje się większą sprawnością energetyczną. Ponieważ w zakresie małych wartości sygnałów wejściowych elementy czynne charakteryzują się dość dużą nieliniowością punkt pracy wzmacniacza klasy B (punkt Q) przenosi się trochę powyżej zera, w ten sposób można wyeliminować zniekształcenia sygnału na wyjściu wzmacniacza. Powstaje wtedy wzmacniacz klasy AB. We wzmacniaczach klasy C można zastosować wiele elementów czynnych z których każdy przewodzić może niewielką część sygnału wyjściowego. Znacznie zwiększa się wtedy sprawność energetyczną takiego wzmacniacza.

8.5.3. Parametry wzmacniacza

Podstawowymi parametrami wzmacniaczy są:

- wzmacnienie (mocy, napięcia, prądu) $k_p(j\omega)$, $k_u(j\omega)$, $k_i(j\omega)$;
- sprawność energetyczna η ;
- impedancja wejściowa $Z_I(j\omega)$ (I – ang, input- wejście);
- impedancja wyjściowa $Z_O(j\omega)$ (O – ang, output- wyjście);
- znamionowe napięcie wejściowe, znamionowe napięcie wyjściowe (lub znamionowe moce) U_{Izn} , U_{Ozn} , P_{Izn} , P_{Ozn} ;
- pasmo przenoszenia wzmacniacza B ;
- zakres dynamicznej pracy wzmacniacza DW ;
- poziom szumów własnych;
- poziom zniekształceń nieliniowych.

Ponieważ większość parametrów zależy od częstotliwości $\omega=2\pi f$, określa się w wielu przypadkach ich zależności częstotliwościowe.



Rys. 8.5.6. Schemat zastępczy układu wzmacniającego

8.5.4. Wzmocnienie wzmacniacza

Wzmocnieniem napięciowym wzmacniacza k_u nazywa się stosunek napięcia wyjściowego U_o do napięcia wejściowego U_I :

$$k_u = \frac{U_o}{U_I} \quad (8.5.1.)$$

Wzmocnieniem prądowym wzmacniacza k_i nazywamy stosunek prądu wyjściowego I_o do prądu wejściowego I_I :

$$k_i = \frac{I_o}{I_I} \quad (8.5.2.)$$

Wzmocnieniem mocy nazywamy stosunek mocy dostarczonej do obciążenia do mocy wejściowej:

$$k_p = \frac{P_o}{P_I} = \frac{U_o \cdot I_o}{U_I \cdot I_I} = k_u \cdot k_i \quad (8.5.3.)$$

Wzmocnienie wyraża się często w mierze logarytmicznej, której jednostką jest decybel (dB).

Wzmocnienia określone w jednostkach bezwymiarowych mogą być przeliczane na decybele według następujących zależności:

$$k_u [dB] = 20 \log \left| \frac{U_o}{U_i} \right| = 20 \log |k_u| \quad (8.5.4.)$$

$$k_i [dB] = 20 \log \left| \frac{I_o}{I_i} \right| = 20 \log |k_i| \quad (8.5.5.)$$

$$k_p [dB] = 10 \log \left| \frac{P_o}{P_i} \right| = 10 \log |k_p| \quad (8.5.6.)$$

8.5.5 Sprawność wzmacniacza

Sprawności wzmacniacza η nazywamy stosunek mocy, którą wzmacniacz oddaje do obciążenia P_o , do sumarycznej mocy, którą wzmacniacz pobiera ze źródła zasilania P_{ZZ} i ze źródła sygnału sterującego P_i . Zwykle moc sygnału pobieranego ze źródła sygnału jest pomijalnie mała, sprawnością energetyczną jest stosunek mocy wyjściowej do mocy pobieranej ze źródła zasilania.

$$\eta = \frac{P_o}{P_i + P_{ZZ}} \approx \frac{P_o}{P_{ZZ}} \quad (8.5.7.)$$

8.5.6. Impedancja wejściowa i wyjściowa

Impedancja wejściowa Z_i jest to stosunek napięcia wejściowego U_i do prądu wejściowego I_i

$$Z_i(j\omega) = \frac{U_i(j\omega)}{I_i(j\omega)} \quad (8.5.8.)$$

Impedancja wyjściowa Z_o jest to stosunek napięcia wyjściowego U_o przy nieobciążonym wyjściu do zwarciovego prądu wyjściowego I_o

$$Z_o(j\omega) = \frac{U_o(j\omega)|_{Z_L=\infty}}{I_o(j\omega)|_{Z_L=0}} \quad (8.5.9.)$$

Dla małych i średnich częstotliwości, gdy przesunięcie fazowe między napięciami a prądami wyjściowymi są pomijalnie małe, części urojone tych impedancji są bliskie zeru. Można wówczas mówić o rezystancjach wejściowej R_i i wyjściowej R_o :

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} \quad (8.5.10.)$$

$$R_o = \frac{U_o}{I_o} \quad (8.5.11.)$$

Znajomość oporności wejściowych i wyjściowych wzmacniacza jest szczególnie ważna z uwagi na warunki dopasowania oporności. Optymalne dopasowanie wzmacniacza do źródła sygnału i obciążenia uzyskuje się wówczas gdy oporność wejściowa jest równa oporności źródła a oporność wyjściowa równa oporności obciążenia. Dopuszcza się dołączenie do wzmacniacza źródła sygnału o oporności mniejszej niż oporność wejściowa i obciążenia o oporności większej niż oporność wyjściowa. Niedopuszczalna jest natomiast odwrotna relacja między opornościami, gdyż prowadzi to do pojawienia się zniekształceń, a w skrajnym przypadku może doprowadzić do zniszczenia wzmacniacza.

8.5.7. Znamionowe napięcie wyjściowe, znamionowe napięcie wyjściowe

Znamionowym napięciem wejściowym U_{Izn} (lub mocą wejściową P_{Izn}) nazywamy wartość napięcia wejściowego (lub mocy wejściowej), przy którym wzmacniacz oddaje do obciążenia określona wymaganiami technicznymi moc wyjściową P_{Ozn} (znamionową) lub na obciążeniu występuje znamionowe napięcie wyjściowe U_{Ozn} . Większość parametrów wzmacniacza podawana jest dla wartości znamionowej napięcia (mocy) wejściowego. Inaczej można powiedzieć, że wartości znamionowe to wartości przy których wzmacniacz zwykle pracuje i osiąga podane parametry.

8.5.8. Pasma przenoszenia wzmacniacza.

Pasma przenoszenia jest to zakres częstotliwości wzmacnianych sygnałów, dla którego moc wyjściowa wzmacniacza nie zmniejsza się poniżej 50% mocy uzyskiwanej w środku pasma. Pasma przenoszenia B dowolnego wzmacniacza określamy jako różnicę częstotliwości granicznej górnej f_g i częstotliwości granicznej dolnej f_d .

$$B = f_g - f_d \quad (8.5.12.)$$

Częstotliwość graniczną dolną i górną pasma przenoszenia określa się jako częstotliwości przy której poziom sygnału wyjściowego jest mniejszy od maksymalnego sygnału wyjściowego o -3dB lub inaczej, jeżeli poziom sygnału wyjściowego jest mniejszy o ok. 0.707 maksymalnego sygnału wyjściowego

$$\frac{U_{Omax}}{U_o(f_d)} = \frac{U_{Omax}}{U_o(f_g)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0.707 \quad (8.5.13.)$$

8.5.9. Zakres dynamicznej pracy wzmacniacza

Zakresem dynamicznej pracy wzmacniacza nazywamy dopuszczalne wartości amplitud sygnałów wejściowych (np. napięć wejściowych od U_{Imin} do U_{Imax}), dla których amplituda sygnału wyjściowego jest proporcjonalna do amplitudy sygnału wejściowego ze współczynnikiem proporcjonalności równym wzmocnieniu.

$$U_I = f(U_o) \quad (8.5.14.)$$

Dla napięć sygnału wejściowego mniejszych od U_{Imin} sygnał jest maskowany przez szumy własne wzmacniacza. U_{Imin} jest najczęściej określane poziomem szumów własnych wzmacniacza. Dla napięć wejściowych większych od U_{Imax} sygnał wyjściowy wzmacniacza będzie niedopuszczalnie zniekształcony, gdyż wskutek przeciążenia elementu aktywnego będzie zmniejszało się jego wzmocnienie. Zakres dynamiczny wzmacniacza określa się podając jego przejściową charakterystykę amplitudową lub stosunek napięcia wejściowego maksymalnego do napięcia minimalnego:

$$D_w = \frac{U_{Imax}}{U_{Imin}} \quad (8.5.15.)$$

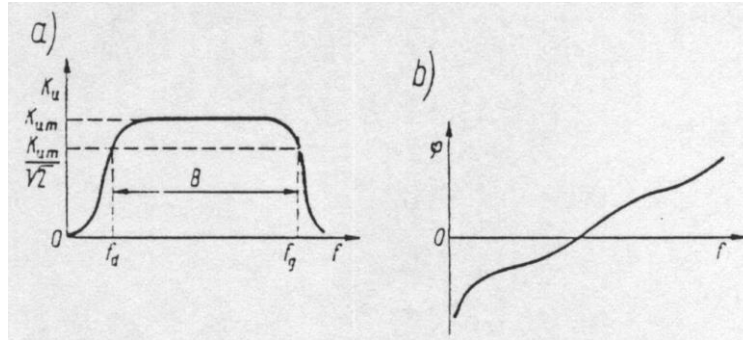
8.5.10. Charakterystyki wzmacniacza

Charakterystyki wzmacniaczy są jednym z najczęściej stosowanych elementów określających ich parametry. Wyróżnić możemy kilka typów charakterystyk:

- amplitudowo – częstotliwościowa;
- fazowo – częstotliwościowa;
- dynamiczna (przejściowa);

8.5.11. Charakterystyki częstotliwościowe - amplitudowa i fazowa

Charakterystyka amplitudowa określa zależność wzmocnienia wzmacniacza od częstotliwości, $k_u=f(f)$. Na osi odciętych znajduje się częstotliwość, najczęściej w skali logarytmicznej. Na osi rzędnych znajduje się wzmocnienie k napięciowe, prądowe lub mocy. Niekiedy podczas badań wzmacniacza na osi Y wykreślamy napięcie wyjściowe U_o przy stałym poziomie napięcia wejściowego $U_i = \text{const}$. Przy określonej częstotliwości lub w określonym paśmie częstotliwości charakterystyka osiąga maksimum określone jako k_{umax} . Na charakterystyce amplitudowej zaznaczyć można pasmo przenoszenia wzmacniacza B , oraz częstotliwości graniczne dolną f_d i górną f_g .

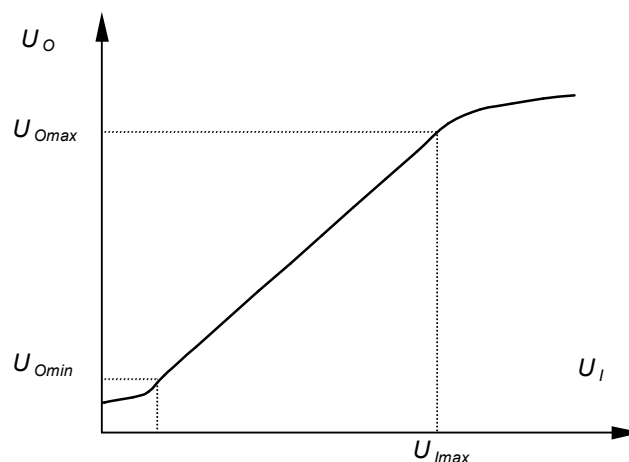


Rys. 8.5.7. Charakterystyki częstotliwościowe wzmacniaczy: a) amplitudowa; b) fazowa.

Z charakterystyki fazowej wzmacniacza $\varphi = f(f)$ określa się przesunięcie fazowe między sygnałami wejściowym i wyjściowym. Dodatkowo można zaobserwować przesunięcie między wzmocnionymi sygnałami o różnych częstotliwościach. Ma to szczególne znaczenie przy określeniu zniekształceń liniowych wzmacniacza.

8.5.12. Charakterystyka dynamiczna

Charakterystyka dynamiczna zwana inaczej przejściową przedstawia zależność napięcia wyjściowego w funkcji napięcia wejściowego $U_o = f(U_i)$. Odczytać z niej można zakresy napięć wejściowych U_{imin} i U_{imax} , zakresy napięć wyjściowych U_{omin} i U_{omax} , dla których wzmacniacza zachowuje stałe wzmocnienie. Minimalne napięcie wejściowe określone jest przez poziom szumów własnych wzmacniacza. Maksymalne natomiast, uwarunkowane jest od elementu aktywnego wzmacniacza. Dla pewnych wartości napięcia wyjściowego wzmacniacz jakby się „nasycał”. Dalszy wzrost napięcia wejściowego powyżej U_{imax} nie spowoduje już wzrostu napięcia wyjściowego, zniekształcając dodatkowo jego kształt. Przykład charakterystyki przejściowej podaje rys 8.5.8.



Rys. 8.5.8. Charakterystyka dynamiczna (przejściowa) wzmacniacza

8.5.13. Zniekształcenia liniowe wzmacniacza

W każdym układzie wzmacniającym występują elementy, których właściwości transmisyjne zależą od częstotliwości lub od spoczynkowego punktu pracy i amplitudy sygnałów. Elementy reaktancyjne są przyczyną nierównomiernego wzmocnienia i różnego przesunięcia fazowego poszczególnych składowych harmonicznych wzmacnianego sygnału. Powoduje to zmianę kształtu wzmacnianych sygnałów okresowych (jeżeli nie są harmoniczne) nawet wówczas, gdy w układzie wzmacniacza nie ma elementów nieliniowych. Zniekształcenia tego typu nazywamy zniekształceniami *liniowymi*. (rys.8.5.8) Zniekształcenia sygnału spowodowane niejednakowym wzmocnieniem jego składowych harmonicznych nazywa się zniekształceniami *częstotliwościowymi*. Zniekształcenia sygnału spowodowane niejednakowym przesunięciem fazowym poszczególnych składowych harmonicznych sygnału nazywa się zniekształceniami *fazowymi*.

Do oceny tych zniekształceń jest wykorzystywana charakterystyka fazowa wzmacniacza. Jeżeli dla wzmacniacza kąt przesunięcia fazowego jest proporcjonalny do częstotliwości, to taki wzmacniacz nie wnosi zniekształceń fazowych, czyli nie powoduje zmiany kształtu wzmacnianych sygnałów (zależnej od przesunięć fazowych), a jedynie przesuwa sygnał w czasie.

Dopuszczalne wartości zniekształceń częstotliwościowych i fazowych zależą od przeznaczenia wzmacniacza. Na przykład jako dopuszczalne przyjmuje się zniekształcenia częstotliwościowe od kilku decybeli (2-4dB) dla wzmacniaczy akustycznych do dziesiątych lub setnych części decybeli dla wzmacniaczy pomiarowych. Zniekształcenia fazowe są mało istotne we wzmacniaczach akustycznych, gdyż ucho ludzkie praktycznie ich nie wychwytuje, natomiast są bardzo ważne we wzmacniaczach pomiarowych. Wzmacniacz nie wnoszący zniekształceń liniowych powinien mieć w roboczym zakresie częstotliwości równomierną charakterystykę amplitudową oraz stałą lub liniową charakterystykę fazową.

8.5.14. Zniekształcenia nieliniowe wzmacniacza

Występujące we wzmacniaczu elementy o nieliniowych charakterystykach prądowo-napięciowych (tranzystory, transformatory) są przyczyną innego rodzaju deformacji kształtu sygnału, zwanych zniekształceniami *nieliniowymi*. Zniekształcenia te są skutkiem zależności wzmocnienia wzmacniacza od amplitudy wzmacnianego sygnału, dlatego nazywane są również zniekształceniami *amplitudowymi*. Przy sinusoidalnym sygnale wejściowym prąd wyjściowy nie jest sinusoidalny. Jest zniekształcony, a więc jest przebiegiem złożonym z przebiegu o częstotliwości sygnału wejściowego (podstawowej) i składowych prądu o większych częstotliwościach, będących wielokrotnościami częstotliwości podstawowej. Widmo sygnału wyjściowego zawiera obok składowej podstawowej składowe harmoniczne wyższego rzędu. Im kształt sygnału wyjściowego bardziej odbiega od sinusoidy, tym amplitudy jego składowych harmonicznych są w większe i jest ich więcej w sygnale wyjściowym. Dlatego też zniekształcenia nieliniowe wnoszone przez wzmacniacz i jego nieliniowość ocenia się przez podanie współczynnika k_h . Jest on równy stosunkowi skutecznej wartości występujących na wyjściu harmonicznych napięcia (lub prądu) o częstotliwości podstawowej:

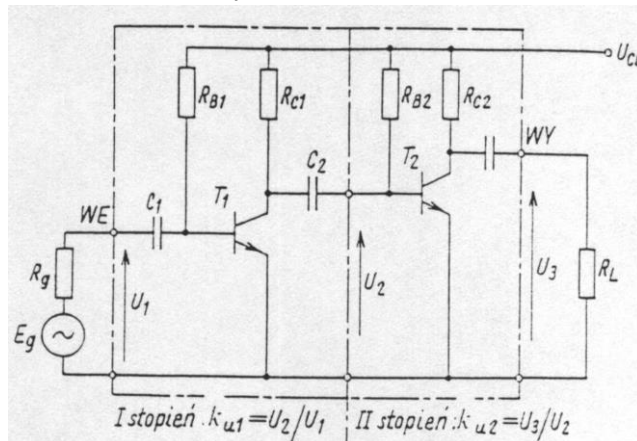
$$k_h = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots}}{U_1} \quad (8.5.16.)$$

gdzie: U_1, U_2, U_3, \dots – amplitudy lub skuteczne wartości pierwszej, drugiej, trzeciej itd. harmonicznych napięcia wyjściowego.

Ponieważ nieliniowymi charakterystykami prądowo-napięciowymi elementów wzmacniających są zazwyczaj nieliniowe pojawiają się we wzmacniaczach zniekształcenia zwane *intermodulacyjnymi*. Powstają one w wyniku zmieszania (modulacji) na nieliniowej charakterystyce dwóch składowych sygnału wejściowego o różnych częstotliwościach (np. harmonicznych). W sygnale wyjściowym o różnych częstotliwościach pojawiają się wówczas niepożądane składowe o częstotliwościach równych sumie i różnicy częstotliwości składowych sygnału wejściowego.

8.5.15. Wzmacniacze wielostopniowe

Gdy jest wymagane wzmocnienie większe od możliwego do uzyskania w pojedynczym stopniu wzmacniającym (wzmacniaczu jednostopniowym), wówczas stosuje się wzmacniacze wielostopniowe, czyli składające się z wielu stopni pojedynczych. W takich wzmacniaczach poszczególne stopnie wzmacniające są połączone tak, że napięcie wyjściowe stopnia poprzedniego jest jednocześnie napięciem wejściowym stopnia następnego. Takie połączenie pojedynczych stopni wzmacniających jest nazwane połączeniem kaskadowym. Poszczególne stopnie mogą być połączone bezpośrednio (wyjście stopnia poprzedniego jest zwarte galwanicznie z wejściem stopnia następnego) - jest to wzmacniacz ze sprzężeniem bezpośrednim pojemnościowo (wyjście stopnia poprzedniego jest połączone poprzez kondensator o odpowiednio dużej pojemności z wejściem stopnia następnego) - jest to wzmacniacz ze sprzężeniem pojemnościowym lub transformatorowo (sygnał wyjściowy stopnia poprzedniego jest przez transformator podawany na wejście stopnia następnego) - jest to wzmacniacz ze sprzężeniem transformatorowym.



Rys. 8.5.9. Schemat dwustopniowego wzmacniacza ze sprzężeniem pojemnościowym

W dwustopniowym wzmacniaczu ze sprzężeniem pojemnościowym (rys. 8.5.9.) rezystory R_{b1} i R_{c1} oraz R_{b2} i R_{c2} stanowią obwód polaryzacji ustalający spoczynkowy punkt pracy tranzystorów T_1 i T_2 . Kondensator sprzęgający C_2 zastosowano w celu oddzielenia napięć stałych występujących w pierwszym i drugim stopniu (punkty pracy tych stopni są od siebie niezależne), natomiast kondensatory C_1 i C_3 oddzielają napięcia stałe występujące we wzmacniaczu od źródła sygnału i obciążenia (Źródło sygnału i obciążenie nie wpływają na punkt pracy tranzystorów T_1 i T_2).

Wzmocnienie dwóch stopni połączonych kaskadowo jest równe iloczynowi wzmocnień poszczególnych stopni k_{u1} i k_{u2} . Na podstawie rys. 8.5.9. można zaobserwować:

$$k_u = \frac{U_3}{U_1} = \frac{U_2}{U_1} \cdot \frac{U_3}{U_2} = k_{u1} \cdot k_{u2} \quad (8.5.17.)$$

Ponieważ moduł wzmocnienia jest często wyrażany w jednostkach logarytmicznych, można zapisać:

$$20 \lg |k_u| = 20 \lg |k_{u1}| + 20 \lg |k_{u2}| \quad (8.5.18)$$

czyli:

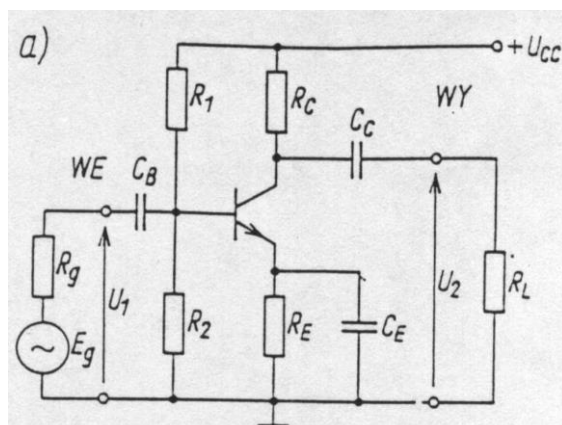
$$(k_u)_{dB} = (k_{u1})_{dB} + (k_{u2})_{dB} \quad (8.5.19)$$

Z właściwości funkcji logarytmicznej wynika więc, że wypadkowe wzmocnienie wzmacniacza wyrażone w dB jest równe sumie wzmocnień wyrażonych w decybelach poszczególnych stopni.

8.5.16. Budowa najprostszego wzmacniacza jednostopniowego

Najprostszym wzmacniacze zbudowanym na jednym tranzystorze jest wzmacniacz w układzie

wspólnego emitera (WE) składa się on z jednego tranzystora bipolarnego *npn* (rys. 8.5.10.).



Rys. 8.5.10. Schemat wzmacniacza w układzie WE

Rezystancje R_1 , R_2 , R_E , R_C tworzą obwód polaryzacji stałoprądowej tranzystora określający jego spoczynkowy punkt pracy, przy czym $R_C + R_E$ jest jednocześnie obciążeniem statycznym (dla prądów stałych) tranzystora. Rezystancja R_E , włączona w pętli stałoprądowego ujemnego sprzężenia zwrotnego, zapewnia stabilizację punktu pracy. Zadaniem kondensatora blokującego o pojemności C_E jest zwieranie do masy sygnału zmiennego. Dla częstotliwości f sygnału, przy której reaktancja pojemnościowa kondensatora $1/2\pi f C_E$ jest bliska zeru, w układzie nie występuje ujemne sprzężenie zwrotne dla sygnału zmiennego. Pojemności C_B i C_C powodują, że przez źródło wzmacnianego sygnału E_g , jak i przez rezystancje obciążenia R_L nie przepływają stałe prądy, lecz tylko sygnał wzmacniany. Tym samym źródło sygnału i obciążenie są odseparowane od tranzystora dla napięć stałych i nie wpływają na jego spoczynkowy punkt pracy.

8.5.17. Wzmacniacze mocy

W każdym wzmacniaczu, oprócz zwiększania amplitudy sygnału (napięcia lub prądu), następuje również wzmocnienie mocy. Wzmacniaczem mocy jest wzmacniacz, którego zadaniem jest dostarczenie do obciążenia (np. głośnika we wzmacniaczach akustycznych) odpowiednio dużej mocy użytecznej wzmacnianego sygnału. Są to przeważnie wzmacniacze o dużym wzmocnieniu prądowym i małym (zwykle bliskim 1) wzmocnieniu napięciowym. Dlatego też stopnie poprzedzające wzmacniacz mocy powinny dostarczać sygnał o odpowiednio dużej amplitudzie, wystarczającej do jego wysterowania.

Głównymi parametrami roboczymi określającymi właściwości wzmacniacza mocy są:

- maksymalna użyteczna moc wyjściowa sygnału P_{omax} ;
- sprawność energetyczna η , określana skutkiem użytecznej mocy wyjściowej do mocy dostarczanej ze źródła zasilania;
- zniekształcenia nieliniowe określone zawartością harmonicznych w sygnale wyjściowym przy wymuszeniu sinusoidalnym o określonej częstotliwości;
- pasmo przenoszenia oraz kształt charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej.

Przy projektowaniu wzmacniaczy mocy dąży się więc do zapewnienia wymaganej użytecznej mocy wyjściowej sygnału, przy jak największej sprawności energetycznej układu i możliwie najmniejszych zniekształceniach nieliniowych.

Klasyfikacja wzmacniaczy mocy uwzględnia dwa podstawowe kryteria:

- położenie spoczynkowego punktu pracy tranzystorów na charakterystyce przejściowej $I_C(U_{BE})$; rozróżnia się tu cztery klasy wzmacniaczy :A, B, C i AB.

- rodzaj sprzężenia wyjścia wzmacniacza z obciążeniem; stosuje się sprzężenie transformatorowe (oddzielające składową stałą od obciążenia) oraz beztransformatorowe (pojemnościowe lub bezpośrednie).

8.5.18. Podstawowe wymagania stawiane wzmacniaczom mocy

Podstawowe wymagania stawiane wzmacniaczom mocy, tzn. duża moc wyjściowa przy maksymalnej sprawności energetycznej i minimalnych zniekształceniach implikują rozwiązania konstrukcyjne stosowane w tych wzmacniaczach. Parametry i stopień mocowego wykorzystania elementu wzmacniającego (tranzystora) zależą od przyjętej klasy pracy wzmacniacza. Przy przejściu od klasy A, przez AB, B do C wzrasta sprawność energetyczna i stopień mocowego wykorzystania tranzystora, lecz zwiększają się zniekształcenia nieliniowe. Z tego względu we wzmacniaczach mocy małej częstotliwości (akustycznych) są stosowane tylko klasy A, AB i B. Klasa C, ze względu na duże zniekształcenia, jest stosowana tylko w selektywnych wzmacniaczach mocy wielkiej częstotliwości, w układach powielaczy częstotliwości.

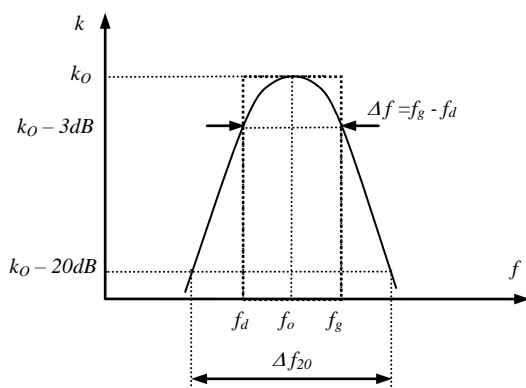
8.5.19. Wzmacniacze selektywne

Wzmacniaczami selektywnymi (inaczej pasmowymi, środkowoprzepustowymi) są nazywane wzmacniacze wzmacniające tylko sygnały o częstotliwości zawartej w wąskim przedziale (paśmie) wokół pewnej częstotliwości środkowej f_0 , a skutecznie tłumiące sygnały spoza tego przedziału. Wzmacniacze o takich właściwościach powinny mieć odpowiednio selektywne charakterystyki amplitudowo – częstotliwościowe. Idealną charakterystyką amplitudowo - częstotliwościową wzmacniacza selektywnego byłaby charakterystyka o kształcie prostokąta, przedstawiona linią przerywaną na rys. 8.5.11. Ponieważ uzyskanie takiej charakterystyki nie jest możliwe w praktyce, więc odstępstwo charakterystyki rzeczywistej od idealnej określa się tzw. współczynnikiem prostokątności p , który jest miarą selektywności wzmacniacza. Obok szerokości pasma przenoszenia Δf i częstotliwości środkowej f_0 jest to jeden z ważniejszych parametrów, zdefiniowany wzorem:

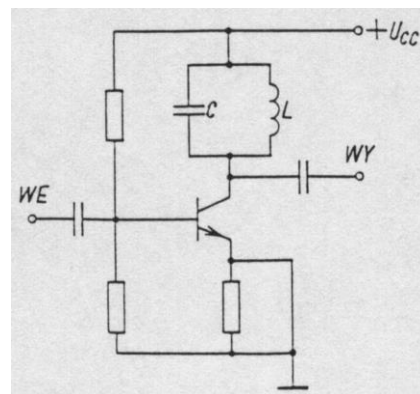
$$p = \frac{\Delta f}{\Delta f_{20}} \quad (8.5.20.)$$

gdzie Δf jest przedziałem częstotliwości określonym dla spadku modułu wzmocnienia o 3 dB poniżej modułu wzmocnienia k_0 dla częstotliwości środkowej f_0 (czyli dla wartości $k_0/\sqrt{2}$) - jest to szerokość pasma przenoszenia wzmacniacza, Δf_{20} (czyli do wartości $k_0/10$) – rys-8.5.11a.

a)



b)



Rys 8.5.11. Wzmacniacz selektywny a) charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa
b) schemat najprostszego wzmacniacza selektywnego zbudowanego na obwodzie rezonansowym LC

Wzmacniacze selektywne są stosowane wówczas, gdy jest potrzebne wydzielenie i wzmocnienie sygnałów o częstotliwościach zawartych w określonym paśmie. Wymagana szerokość pasma zależy jednak od przeznaczenia wzmacniacza. Jeżeli zadaniem wzmacniacza, jak np. w woltomierzu selektywnym, jest wydzielenie tylko sygnału o jednej częstotliwości z sygnału o szerszym widmie, to

otrzymamy ogólną zależność, słuszną dla układów ze sprzężeniem zwrotnym:

$$\text{gdzie: } k_f = \frac{k}{1 \pm \beta \cdot k} \quad (8.5.25.)$$

- k_f - wzmocnienie układu z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego, czyli wynikowe wzmocnienie wzmacniacza ze sprzężeniem zwrotnym;
- k - wzmocnienie układu z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego, czyli tzw. wzmocnienie bez sprzężenia zwrotnego;
- β - funkcja przenoszenia (transmitancja) toru sprzężenia zwrotnego.

Znak „+” w mianowniku występuje dla sprzężenia ujemnego, znak „-” dla dodatniego.

Z analizy tej zależności wynika, że jeżeli iloczyn $k\beta$ - zwany wzmocnieniem pętli sprzężenia zwrotnego – jest dla układu z ujemnym sprzężeniem zwrotnym dużo większy od 1, czyli gdy $k \Rightarrow \infty$, to wzmocnienie układu ze sprzężeniem zwrotnym $k_f = 1/\beta$, czyli jest określone wyłącznie właściwościami transmisyjnymi toru sprzężenia zwrotnego.

Natomiast dla układów z dodatnim sprzężeniem zwrotnym zwiększa się wzmocnienie, lecz pogarsza stabilność i w układzie są możliwe oscylacje na jednej z częstotliwości zakresu roboczego, gdy $k\beta = 1$.

8.5.21. Cel stosowania ujemnego sprzężenia zwrotnego w układach

Ujemne sprzężenie zwrotne wpływa bardzo korzystnie na większość parametrów wzmacniaczy:

- poprawia stabilność wzmacniacza (układ jest mniej wrażliwy np. na wahania napięć zasilających i zmianę temperatury);
 - zmniejsza szумы i zniekształcenia (zarówno liniowe, jak i nieliniowe);
 - zwiększa górną i dolną częstotliwość graniczną, poszerza pasmo przenoszenia wzmacniacza;
 - umożliwia kształtowanie charakterystyki częstotliwościowej;
 - umożliwia modyfikację impedancji wejściowej i wyjściowej.
- Efekt ubocznym, czasem niepożądanym jest zmniejszenie wzmocnienia.

8.5.22. Klasyfikacja ujemnego sprzężenia zwrotnego

Ujemne sprzężenie zwrotne klasyfikuje się zależnie od sposobu pobierania sygnału zwrotnego z wyjścia układu oraz sposobu doprowadzenia go na wejście. Sygnał sprzężenia zwrotnego może być proporcjonalny do napięcia wyjściowego, mówi się wówczas o sprzężeniu *napięciowym*, lub prądu wyjściowego, w tym przypadku mówi się o sprzężeniu *prądowym*. Gdy sygnał sprzężenia zwrotnego jest doprowadzony do wejścia szeregowo z sygnałem wejściowym, takie sprzężenie nazywa się *szeregowym*, gdy zaś równolegle – *równoległym*. Rozróżnia się cztery podstawowe układy z ujemnym sprzężeniem zwrotnym:

- napięciowo – szeregowym;
- napięciowo – równoległym;
- prądowo – równoległym;
- prądowo – szeregowym.

8.5.23. Wpływ ujemnego sprzężenia zwrotnego na parametry wzmacniacza

Ze wzoru na wzmocnienie napięciowe w układzie z ujemnym sprzężeniem zwrotnym wynika, że przy silnym sprzężeniu wartość iloczynu $\beta \cdot k_u$ jest znacznie większa od jedności, w związku z czym wzór upraszcza się do postaci:

$$k_{uf} = \frac{k_u}{\beta_u \cdot k_u} = \frac{1}{\beta_u} \quad (8.5.26.)$$

co powoduje, że wzmocnienie wzmacniacza przestaje zależeć od parametrów elementów wzmacniających a jest zależne jedynie od rezystancji w układzie sprzężenia zwrotnego. Stanowi to podstawę do budowy wzmacniaczy operacyjnych o bardzo stabilnym wzmocnieniu.

Zniekształcenia w układzie z ujemnym sprzężeniem zwrotnym są zmniejszone tyle razy ile razy obniżone zostało wzmocnienie:

$$k_{hf} = \frac{k_h}{1 + \beta_u \cdot k_u} \quad (8.5.27.)$$

gdzie:

- k_{hf} - współczynnik zniekształceń w układzie z ujemnym sprzężeniem zwrotnym,
- k_h - współczynnik zniekształceń w układzie bez sprzężenia zwrotnego.

Dolna graniczna częstotliwość pasma przenoszenia w układzie z ujemnym sprzężeniem zwrotnym jest obniżona według wzoru:

$$f_{df} = \frac{f_d}{(1 + \beta_u \cdot k_u)} \quad (8.5.28.)$$

Górna graniczna jest zwiększona:

$$f_{gf} = f_g \cdot (1 + \beta_u \cdot k_u) \quad (8.5.29.)$$

gdzie:

- f_{df}, f_{gf} – częstotliwości dolna i górna pasma przenoszenia w układzie z ujemnym sprzężeniem zwrotnym,
- f_d, f_g – częstotliwości dolna i górna pasma przenoszenia w układzie bez sprzężenia zwrotnego.

Rezystancja wejściowa i wyjściowa przy ujemnym sprzężeniu równoległym zostaje zmniejszona

$$R_{yf} = R_I \cdot (1 + \beta_u \cdot k) \quad (8.5.30.)$$

$$Z_{yf} = Z_I \cdot (1 + \beta_u \cdot k) \quad (8.5.31.)$$

a przy sprzężeniu szeregowym zwiększona:

$$R_{yf} = \frac{R_I}{1 + \beta_i \cdot k_i} \quad (8.5.32.)$$

$$Z_{yf} = \frac{Z_I}{1 + \beta_i \cdot k_i} \quad (8.5.33.)$$

8.6 Literatura

1. Rusek M., Pasierbiński J., *Elementy i układy elektroniczne w pytaniach i odpowiedziach*, WNT 1997.
2. Koziej E., Sochoń B., *Elektrotechnika i elektronika*, Warszawa 1986.
3. Przeździecki F., *Elektrotechnika i elektronika*, Warszawa, PWN 1985.
4. *Elektrotechnika i elektronika dla nieelektryków*, Praca zbiorowa, WNT 2006.
5. Jaczewski J., Opolski A., Stolz J., *Podstawy elektroniki i energoelektroniki*, WNT 1981.
6. Pilawski M., *Podstawy elektrotechniki*, WSiP 1982.
7. Rusek A., *Podstawy elektroniki*, WSiP 1989.
8. Stacewicz T., Kotlicki A., *Elektronika w laboratorium naukowym*, PWN 1994.

8.7 Efekty kształcenia

Metody i kryteria oceny				
EK1	Ma podstawową wiedzę w zakresie pojęć, praw z zakresu elektrotechniki i elektroniki.			
Metody oceny	egzamin pisemny, egzamin ustny, sprawdziany i prace kontrolne w semestrze.			
Kryteria/ Ocena	2	3	3,5 - 4	4,5 - 5
Kryterium 1 Wiedza w zakresie pojęć elektrotechniki i elektroniki.	Brak lub niewystarczająca podstawowa wiedza w zakresie pojęć i definicji związanych z tematem.	Opanowana podstawowa wiedza w zakresie pojęć i definicji związanych z tematem.	Zna i potrafi scharakteryzować/o mówić podstawowe pojęcia i definicje Zna i potrafi scharakteryzować/o mówić podstawowe i rozszerzone pojęcia, definicje.	Zna i potrafi przeanalizować pojęcia i definicje oraz wskazać możliwości ich wykorzystania w technice morskiej Biegłe zna i potrafi przeanalizować oraz wskazać możliwości wykorzystania w technice morskiej.
Kryterium 2 Wiedzę w zakresie praw elektrotechniki i elektroniki.	Brak lub niewystarczająca podstawowa wiedza w zakresie praw związanych z tematem.	Opanowana podstawowa wiedza w zakresie praw związanych z tematem.	Zna i potrafi scharakteryzować/o mówić podstawowe prawa Zna i potrafi scharakteryzować/o mówić podstawowe i rozszerzone prawa.	Zna i potrafi przeanalizować prawa oraz wskazać możliwości ich wykorzystania w technice morskiej Biegłe zna i potrafi przeanalizować oraz wskazać możliwości wykorzystania w technice morskiej.
EK2	Posiada umiejętność wykorzystania podstawowych praw elektrotechniki i elektroniki do analizy rachunkowej podstawowych elementów i obwodów elektronicznych.			
Metody oceny	zaliczenie ćwiczeń, laboratoriów/ symulatorów, sprawozdanie/ raport.			
Kryteria/ Ocena	2	3	3,5 - 4	4,5 - 5
Kryterium 1 Umiejętność wykorzystania podstawowych praw elektrotechniki i elektroniki do analizy rachunkowej podstawowych elementów i obwodów elektronicznych.	Brak lub niewystarczająca podstawowa wiedza w zakresie wykorzystania pojęć, definicji i praw związanych z tematem.	Opanowana podstawowa wiedza w zakresie wykorzystania pojęć, definicji i praw związanych z tematem.	Zna i potrafi wykorzystać podstawowe pojęcia, definicje i prawa do analizy podstawowych obwodów Zna i potrafi wykorzystać podstawowe i pochodne pojęcia, definicje i prawa do analizy podstawowych obwodów w technice morskiej.	Zna i potrafi wykorzystać podstawowe i pochodne pojęcia, definicje i prawa oraz wzajemne zależności między nimi w technice morskiej Biegłe zna i potrafi przeanalizować oraz wskazać możliwości wykorzystania w technice morskiej.
EK3	Ma podstawową wiedzę teoretyczną w zakresie struktury, przetwarzania, transmisji i pomiarów sygnałów elektrycznych.			
Metody oceny	egzamin pisemny, egzamin ustny, sprawdziany i prace kontrolne w semestrze.			
Kryteria/ Ocena	2	3	3,5 - 4	4,5 - 5

Kryterium 1 Podstawowa wiedza teoretyczna w zakresie struktury, przetwarzania, transmisji i pomiarów sygnałów elektrycznych.	Brak lub niewystarczająca podstawowa wiedza w zakresie struktury, przetwarzania, transmisji i pomiarów sygnałów.	Opanowana podstawowa wiedza w zakresie struktury, przetwarzania, transmisji i pomiarów sygnałów.	Zna i potrafi scharakteryzować/omówić podstawowe pojęcia z zakresu struktury, przetwarzania, transmisji i pomiarów sygnałów Zna i potrafi scharakteryzować/omówić podstawowe i rozszerzone pojęcia z zakresu struktury, przetwarzania, transmisji i pomiarów sygnałów występujących w technice morskiej.	Zna i potrafi przeanalizować pojęcia z zakresu struktury, przetwarzania, transmisji i pomiarów sygnałów występujących w technice morskiej Biegłe zna i potrafi przeanalizować pojęcia z zakresu struktury, przetwarzania, transmisji i pomiarów sygnałów występujących w technice morskiej.
EK4	Posiada umiejętności pomiarów, analizy i przetwarzania sygnałów elektrycznych.			
Metody oceny	zaliczenie ćwiczeń, laboratoriów/ symulatorów, sprawozdanie/ raport.			
Kryteria/ Ocena	2	3	3,5 - 4	4,5 - 5
Kryterium 1 Umiejętności pomiarów, analizy i przetwarzania sygnałów elektrycznych.	Brak lub niewystarczające podstawowe umiejętności w zakresie pomiarów, analizy i przetwarzania sygnałów.	Opanowane podstawowe umiejętności w zakresie pomiarów i analizy sygnałów.	Opanowane podstawowe umiejętności w zakresie pomiarów, analizy i przetwarzania sygnałów Opanowane w stopniu dobrym podstawowe umiejętności w zakresie pomiarów, analizy i przetwarzania sygnałów występujących w technice morskiej.	Opanowane w stopniu bardzo dobrym podstawowe umiejętności w zakresie pomiarów, analizy i przetwarzania sygnałów występujących w technice morskiej Biegłe zna i potrafi przeanalizować pojęcia z zakresu pomiarów, analizy i przetwarzania złożonych sygnałów występujących w technice morskiej.
EK5	Ma podstawową wiedzę w zakresie zasad działania, budowy, eksploatacji podstawowych obwodów i urządzeń elektronicznych.			
Metody oceny	egzamin pisemny, egzamin ustny, sprawdziany i prace kontrolne w semestrze.			
Kryteria/ Ocena	2	3	3,5 - 4	4,5 - 5

Kryterium 1 Wiedza w zakresie zasad działania, budowy, eksploatacji podstawowych obwodów i urządzeń elektronicznych.	Brak lub niewystarczająca podstawowa wiedza w zakresie zasad działania, budowy, eksploatacji podstawowych obwodów i urządzeń.	Opanowana podstawowa wiedza w zakresie zasad działania, budowy, eksploatacji podstawowych obwodów i urządzeń.	Zna i potrafi scharakteryzować/omówić podstawowe i rozszerzone pojęcia z zakresu zasad działania, budowy, eksploatacji podstawowych obwodów i urządzeń.	Zna i potrafi przeanalizować pojęcia z zakresu zasad działania, budowy, eksploatacji podstawowych obwodów i urządzeń Biegłe zna i potrafi przeanalizować pojęcia z zakresu zasad działania, budowy, eksploatacji podstawowych obwodów i urządzeń występujących w technice morskiej.
EK6	Posiada umiejętność analizy działania, pomiaru parametrów oraz wyznaczania charakterystyk podstawowych obwodów i urządzeń elektronicznych.			
Metody oceny	zaliczenie ćwiczeń, laboratoriów/ symulatorów, sprawozdanie/ raport.			
Kryteria/ Ocena	2	3	3,5 - 4	4,5 - 5
Kryterium 1 Umiejętność analizy działania, pomiaru parametrów oraz wyznaczania charakterystyk podstawowych obwodów i urządzeń elektronicznych.	Brak lub niewystarczające podstawowe umiejętności w zakresie analizy działania, pomiaru parametrów oraz wyznaczania charakterystyk.	Opanowane podstawowe umiejętności w zakresie analizy działania i pomiaru parametrów podstawowych obwodów i urządzeń.	Opanowane podstawowe umiejętności w zakresie analizy działania, pomiaru parametrów oraz wyznaczania charakterystyk podstawowych obwodów i urządzeń Opanowane w stopniu dobrym podstawowe umiejętności w zakresie analizy działania, pomiaru parametrów oraz wyznaczania charakterystyk podstawowych obwodów i urządzeń.	Opanowane w stopniu bardzo dobrym analizy działania, pomiaru parametrów oraz wyznaczania charakterystyk podstawowych obwodów i urządzeń Biegłe opanowane umiejętności w zakresie analizy działania, pomiaru parametrów oraz wyznaczania charakterystyk podstawowych obwodów i urządzeń występujących w technice morskiej.