

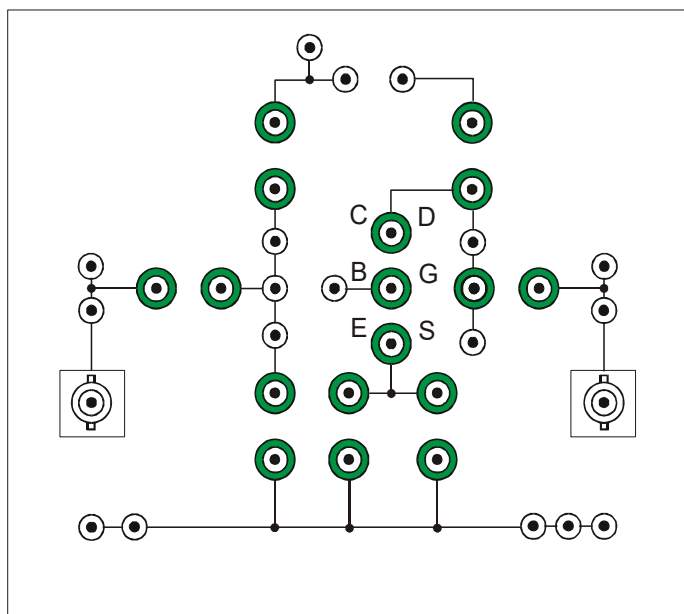
TRANZYSTOR W UKŁADZIE WZMACNIACZA

CEL ĆWICZENIA

Tematem ćwiczenia są podstawowe właściwości jednostopniowego wzmacniacza pasmowego z tranzystorem bipolarnym. Ćwiczenie składa się z dwóch części. Pierwsza z nich, mająca charakter wprowadzenia, jest poświęcona ilustracji zasady wzmacniacza za pomocą elementu sterowanego, na przykładzie elementarnego wzmacniacza napięciowego z tranzystorem w konfiguracji WE. W części drugiej następuje realizacja wzmacniacza począwszy od jego zaprojektowania, poprzez symulację działania a skończywszy na zmontowaniu układu rzeczywistego i jego pomiarach. W tej ostatniej części dokonuje się obserwacji statycznej napięciowej charakterystyki przejściowej oraz pomiaru charakterystyki częstotliwościowej, na bazie, której określone są podstawowe parametry wzmacniacza.

A. OPIS UKŁADU WZMACNIACZA WE I STANOWISKA I LABORATORYJNEGO

A.1 UNIWERSALNA PODSTAWKA LABORATORYJNA DO BADANIA TRANZYSTORÓW



Rys. 1. Uniwersalna podstawa laboratoryjna do badania tranzystorów

Pomiary laboratoryjne przewidziane w ramach ćwiczenia realizowane są z wykorzystaniem uniwersalnej podstawki laboratoryjnej widocznej na Rys. 1. Podstawa ta umożliwia realizację określonych układów pomiarowych poprzez odpowiednią konfigurację elementów oraz ich połączenia przy pomocy przewodów „bananowych” oraz „zworek”. Elementy badanego układu należy przykręcić do odpowiednich zacisków podstawki a następnie połączyć zgodnie z danym schematem”. Należy przy tym pamiętać, że linie wytrasowane na powierzchni podstawki oznaczają połączenia galwaniczne. Element sterowany (tranzystor bipolarny lub unipolarny) należy przykręcić do zacisków oznaczonych C-B-E, (D)-(G)-(S) w taki sposób, aby były widoczne właściwe oznaczenia jego elektrod, tzn. dla tranzystora bipolarnego powinny być widoczne oznaczenia C-B-E (kolektor, baza, emiter) natomiast unipolarnego oznaczenia (D)-(G)-(S) (dren, bramka, źródło). Podstawa posiada również możliwość podłączenia przewodów zmiennoprądowych (koncentrycznych) w dwóch jej punktach, które w zależności od konfiguracji badanego układu mogą określać jego wejście i wyjście.

A.2. UPROSZCZONY OPIS BADANEGO UKŁADU WZMACNIACZA

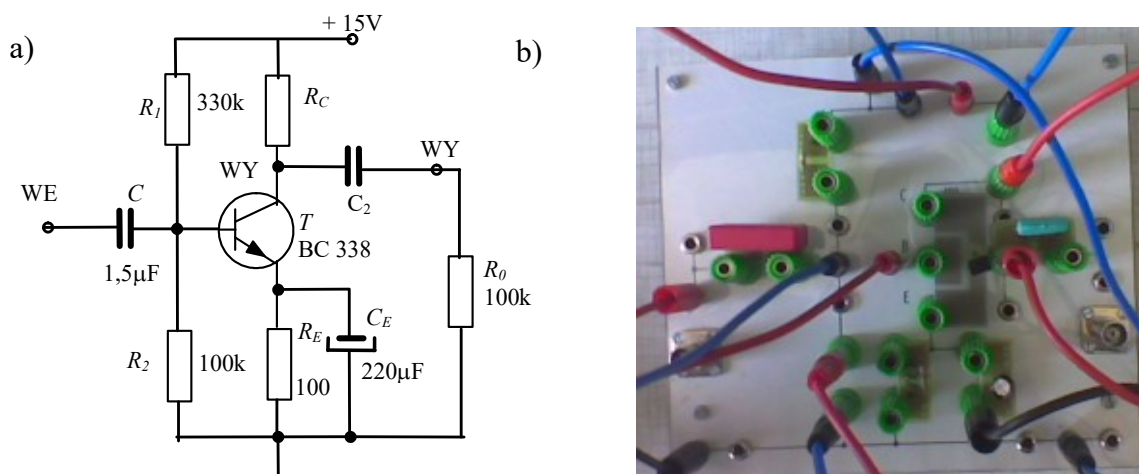
Schemat badanego w ćwiczeniu, jednostopniowego tranzystorowego wzmacniacza napięciowego w konfiguracji WE przedstawia Rys.2. Element R_0 reprezentuje tu rezystancję obciążenia. Badany układ wzmacniacza uzyskuje się poprzez odpowiednie połączenie tranzystora bipolarnego T (element sterowany) z elementami ustalającymi jego punkt pracy (oporniki R_1, R_2, R_C, R_E) oraz elementami ograniczającymi jego pasmo przenoszenia (kondensatory C, C_2, C_E). Elementy układu są tak dobrane, aby o wartości wzmocnienia napięciowego (k_u) i dolnej częstotliwości granicznej ($f_{d\beta}$) decydowały przede wszystkim odpowiednio R_C i C_2 . Pierwszy z wymienionych elementów pozostaje w związku ze wzmocnieniem napięciowym zgodnie z zależnością:

$$k_u = -g_m (R_C \parallel R_0) \quad (1.)$$

gdzie g_m to transkonduktancja o której szerzej napisano w dalszej części instrukcji. Z pojemnością C_2 związany jest z kolei biegun transmitancji układu, który jednocześnie w naszym przypadku określa dolną częstotliwość graniczną według relacji:

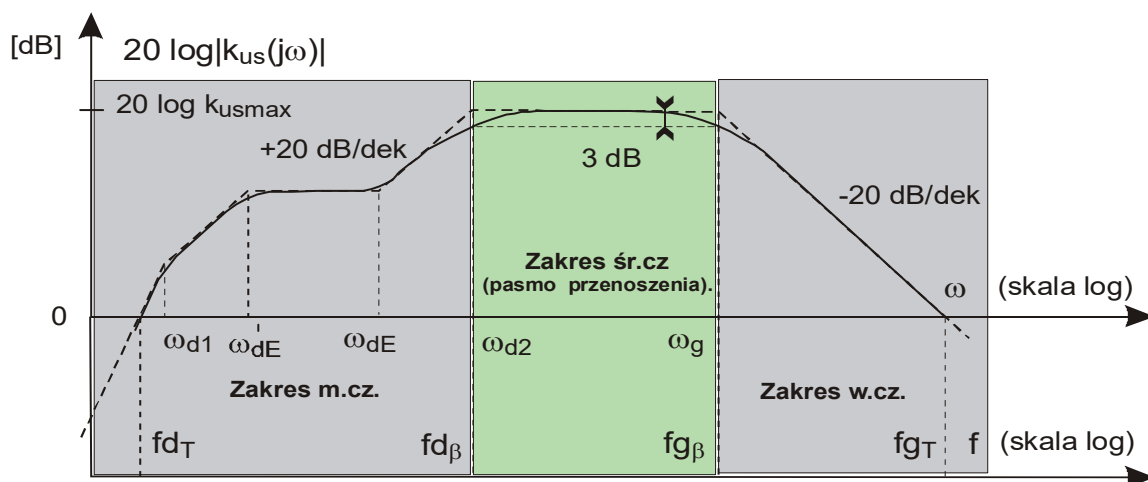
$$f_{d\beta} = \frac{1}{2\pi C_2 (R_{wy} + R_o)} \quad (2.)$$

gdzie $R_{wy} \approx R_C$. Elementy te są wmontowywane do układu przez wykonującego ćwiczenie po obliczeniu ich wartości wg podanych w p.3 założeń projektowych. Pozostałe elementy należy dobrać według schematu widocznego na Rys 2



Rys. 2. a) Schemat ideowy typowego jednostopniowego wzmacniacza napięciowego), b) widok badanego układu zrealizowanego przy pomocy uniwersalnej podstawki laboratoryjnej do badania tranzystorów

Najważniejsze parametry wzmacniacza określa jego **charakterystyka częstotliwościowa**. Na Rys.3 przedstawiono przykład takiej charakterystyki, czyli zależność modułu wzmocnienia napięciowego skutecznego (k_{us}), którego wartości są podawane w decybelach (dB) w funkcji częstotliwości (f) oraz pulsacji (ω) wykreślone w skali logarytmicznej. Widoczna tu charakterystyka pozwala określić **maksymalne wzmocnienie** (k_{usmax}) oraz **pasmo przenoszenia** ($f_{d\beta}$ - $f_{g\beta}$). Poszczególne bieguny transmitancji (ich pulsacje) są związane z pojemnościami układowymi dla zakresu m.cz. (małej częstotliwości), mianowicie ω_{d2} jest określona przez pojemność C_2 , za ω_{d1} odpowiada C , natomiast z pojemnością C_E związane są pulsacje ω_{dE} i $\omega_{dE'}$. Pasmo przenoszenia jest ograniczone od dołu przez dolną częstotliwość graniczną $f_{d\beta}$ której odpowiada pulsacja ω_{d2} . Z definicji częstotliwość tą określa się jako częstotliwość, dla której następuje spadek maksymalnego wzmocnienia napięciowego o 3 dB. W skali liniowej odpowiada to spadkowi **wzmocnienia do poziomu 0.707 k_{usmax}**



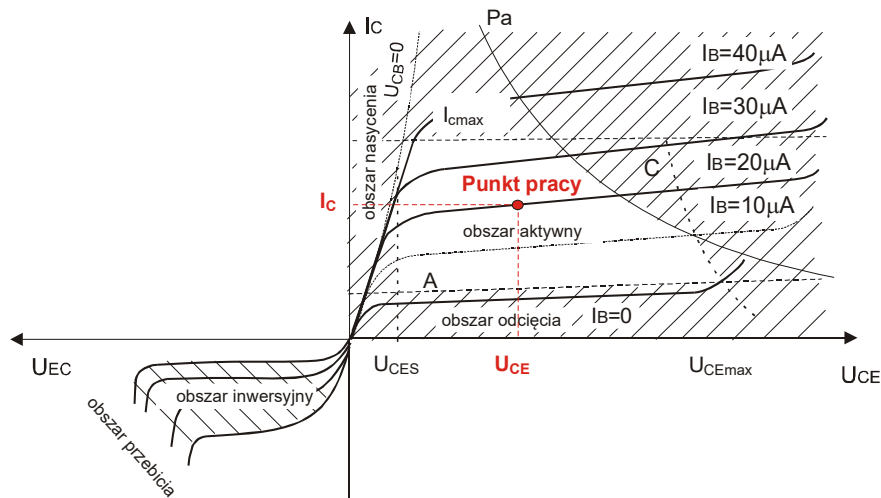
Rys.3. Charakterystyka częstotliwościowa (amplitudowa) wzmacniacza przedstawionego na Rys.2.

Górna częstotliwość graniczna $f_{g\beta}$ jest zdeterminowana przez pojemności wewnętrzne tranzystora więc na rozpatrywanym tu etapie projektowania wzmacniacza nie mamy na nią wpływu, ale możemy ją określić poprzez symulację, pomiar wskazanego układu w szerokim zakresie częstotliwości lub obliczenia analityczne według zależności:

$$f_{g\beta} = \frac{1}{C_{we}[r_{b'e} \parallel (r_{b'b} + R_Z)]} \quad (3.)$$

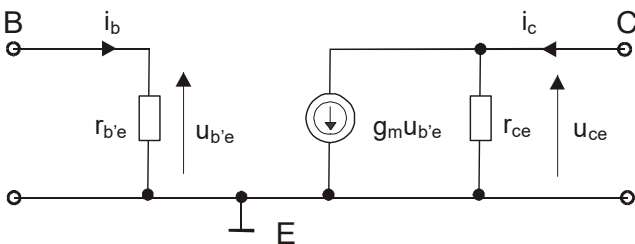
gdzie C_{we} to pojemność widziana z zacisków wejściowych układu, $R_Z = R_1 \parallel R_2 \parallel R_g$ natomiast $r_{b'e}$ i $r_{b'b}$ to elementy schematu małosygnałowego tranzystora. Więcej na temat powyższych parametrów przedstawiono w dalszej części niniejszej instrukcji oraz w materiałach wykładowych

W części badawczej wyjaśnienia wymagają pomiary dotyczące **wpływu punktu pracy tranzystora na jego właściwości wzmacniające** i pomiar charakterystyki przejściowej wzmacniacza. Punkt pracy tranzystora pracującego w układzie jak na Rys. 2 (wartości stałe I_C i U_{CE}) należy tak ustawić, aby element znajdował się w stanie **aktywnym normalnym**, gdyż w stanie tym tranzystor ma najlepsze właściwości wzmacniające mały sygnał zmienny. Często fakt ten ilustrowany jest na charakterystykach wyjściowych tak jak pokazano na **Rys 4**.



Rys.4. Charakterystyki statyczne (wyjściowe) tranzystora bipolarnego pracującego w konfiguracji WE z zaznaczonym punktem pracy w obszarze aktywnym (normalnym)

W naszym przypadku w celu określenia współczynnika wzmocnienia prądowego (β lub h_{FE} lub h_{21e} lub h_{21e0}) tranzystora BC 338 (patrz Rys.2) posługujemy się dostępnymi w Internecie danymi katalogowymi z których wynika, że $\beta = 100$ zmierzono w punkcie pracy o wartościach $I_C = 5 \text{ mA}$ oraz $U_{CE} = 5 \text{ V}$. Możemy więc przyjąć powyższe dane przy projektowaniu naszego układu, gdyż jak widać na Rys. 4. zapewnia to pracę tranzystora w obszarze aktywnym i wartość współczynnika wzmocnienia zapewnia duże wzmocnienie. Pozostaje jeszcze kwestia zbadania jak ewentualna zmiana tych wartości może wpłynąć na właściwości wzmacniające naszego układu. W tym celu musimy rozważyć tranzystor w oparciu o jego schemat małosygnałowy. Zakres małych i średnich częstotliwości to zakres, w którym częstotliwości sygnału wejściowego są na tyle małe, że wszystkie reaktancje pojemnościowe związane z małosygnałowym modelem tranzystora są bardzo duże w porównaniu z impedancjami pozostałych elementów modelu. Umożliwia to traktowanie elementów pojemnościowych układu jako rozwarci. **Schemat zastępczy hybryd-II** dla tranzystora bipolarnego w tym zakresie częstotliwości przedstawia **Rys.5**.

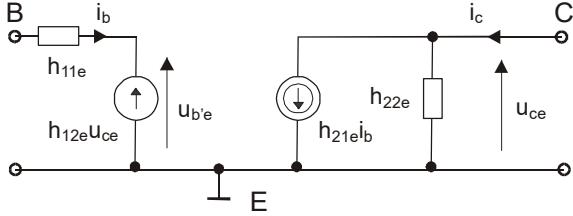


Rys.5. Model hybryd II dla tranzystora bipolarnego w układzie WE

Dla powyższego modelu tranzystora mamy następujące zależności:

$$r_{b'e} = \left. \frac{u_{b'e}}{i_b} \right|_{u_{ce}=0} \quad i_c = g_m u_{b'e} + \frac{u_{ce}}{r_{ce}} \quad g_m = \left. \frac{i_c}{u_{b'e}} \right|_{u_{ce}=0}, \quad (4.)$$

natomiast dla **modelu z parametrami h** widocznym na **Rys.6** prawdziwe są równania:



$$u_{be} = h_{11e} i_b + h_{12e} u_{ce} \quad (5.)$$

$$i_c = h_{21e} i_b + h_{22e} u_{ce} \quad (6.)$$

$$h_{21e} = \left. \frac{i_c}{i_b} \right|_{u_{ce}=0} \quad (7.)$$

Rys.6 Model z parametrami h dla tranzystora bi-

Wykorzystując zależności (4.) dla wartości chwilowych możemy napisać:

$$h_{21e0} = \frac{i_c}{i_b} = \frac{g_m u_{b'e}}{\frac{u_{b'e}}{r_{b'e}}} = g_m r_{b'e}, \quad (8.)$$

porównując zaś oba przedstawione powyżej małosygnałowe schematy zastępcze otrzymujemy:

$$h_{11e} = r_{b'e} \quad (9.)$$

Analizując zależności (4.) można również dojść do wniosku, że **transkonduktancja (g_m)** jest to nachylenie charakterystyki $I_C = f(U_{BE})$. Uwzględniając zależność: $I_C = \beta I_B$ charakterystykę $I_C = f(U_{BE})$ można określić jako podobną do zależności $I_B = f(U_{BE})$ stąd:

$$I_C = I_{E0} \left[\exp \frac{q U_{BE}}{\eta k T} - 1 \right] \cong I_{E0} \left[\exp \frac{q U_{BE}}{\eta k T} \right] \quad (10.)$$

Wracając do wyrażenia (4.) otrzymujemy:

$$g_m = \left. \frac{dI_C}{dU_{BE}} \right|_{\text{w p. pracy}} = \frac{q}{\eta k T} I_C \bigg|_{U_{CE}=\text{const}} \cong 38.9 I_C \bigg|_{T=300K} \quad (11.)$$

Jak więc widać transkonduktancja zależy wprost proporcjonalnie od prądu kolektora I_C . Znając parametr h_{21e0} podawany w katalogach i jedną z wielkości g_m lub $r_{b'e}$ możemy łatwo określić pozostałe i tak np. dla tranzystora o wartości parametru $h_{21e0}=200$ pracującego przy prądzie $I_C=1$ mA otrzymujemy wartość $g_m \approx 40$ ms oraz $r_{b'e}=5$ kΩ. Rozważając parametr r_{ce} jako:

$$r_{ce} = \left. \frac{u_{ce}}{i_c} \right|_{i_b=0} \quad (12.)$$

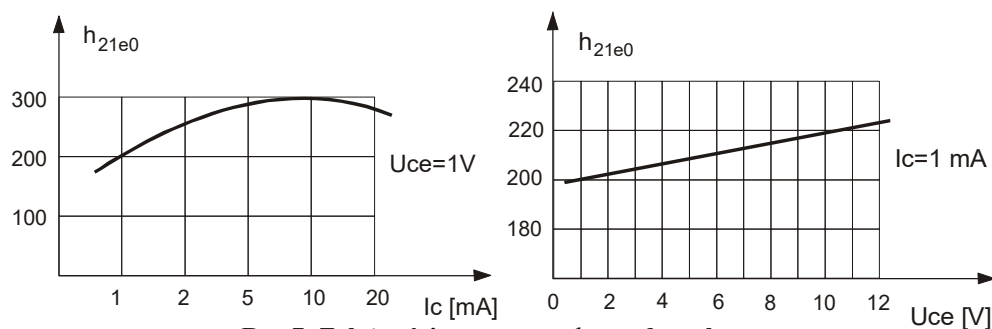
oraz parametr h_{22} jako:

$$h_{22e} = \left. \frac{i_c}{u_{ce}} \right|_{i_b=0} \quad \text{stąd} \quad \boxed{r_{ce} = \frac{1}{h_{22e}}} \quad (13.)$$

Wartości h_{22e} mogą zmieniać się w granicach od ok. 1 μS do 50 mS, co odpowiada wartościom r_{ce} w granicach od 20 kΩ do 1 MΩ. W niektórych danych katalogowych spotyka się także wartości admitancji wyjściowej dla układu WB zdefiniowanej w stanie rozwarcia na wejściu, czyli dla $i_e=0$.

$$h_{22b} = \left. \frac{i_c}{u_{cb}} \right|_{i_e=0} \Rightarrow h_{22e} = h_{21e0} h_{22b} \quad (14.)$$

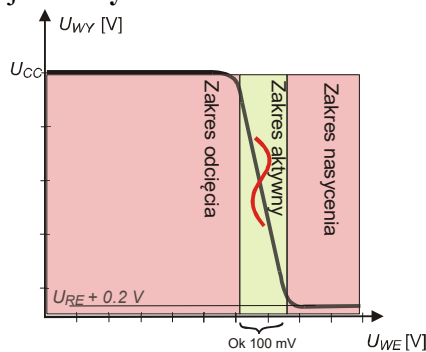
Powyższe zależności pomiędzy parametrami schematów zastępczych tranzystora, odpowiednio wykorzystane pozwolą nam wyznaczyć wartości elementów układu wzmacniacza dla zadanych warunków projektowych. Jak wcześniej wspomniano jednym z zadań pomiarowych ćwiczenia jest zbadanie zależności h_{21e0} od punktu pracy tranzystora. Przykładowe zależności tego typu ilustrują wykresy poniżej:



Rys.7. Zależności parametru h_{21e0} od punktu pracy

Warto tu zwrócić uwagę, że współczynnik wzmocnienia prądowego rośnie wraz ze wzrostem wartości I_c i U_{CE} ale z drugiej strony próba bezrefleksyjnego używania tego faktu do zwiększania wzmocnienia wzmacniacza może doprowadzić do przesunięcia punktu pracy tranzystora poza obszar zakresu aktywnego (patrz Rys. 4) i uzyskania efektu zupełnie przeciwnego.

Charakterystyka przejściowa wzmacniacza to zależność napięć stałych w postaci $U_{wy} = f(U_{we})$. Ogólna postać takiej charakterystyki może wyglądać jak na Rys 8.

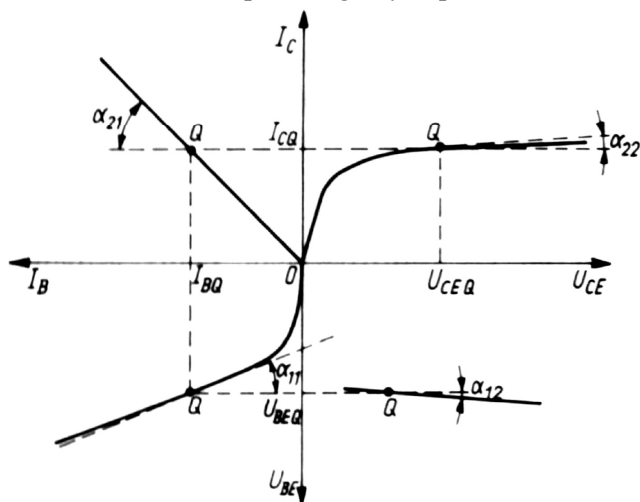


Rys.8. Charakterystyka przejściowa wzmacniacza

Można na niej określić trzy zakresy pracy elementu aktywnego (tranzystora), który jest sercem układu wzmacniacza. Z punktu widzenia poprawności działania naszego układu, który jest wzmacniaczem liniowym, najważniejszy jest zakres aktywny. Szerokość tego zakresu determinuje maksymalną wartość amplitudy wzmacnianego sygnału.

B. OPIS SYMULACJI CHARAKTERYSTYK TRANZYSTORA BIPOLARNEGO

W ramach niniejszego ćwiczenia niezbędne jest określenie **punktu pracy** oraz parame^{trów} **małosygnałowych** tranzystora, co pozwala w konsekwencji na przeprowadzenie obliczeń projektowych i w dalszej kolejności uruchomienie układu wzmacniacza. Można tego dokonać posługując się danymi katalogowymi dla wybranego tranzystora, ale o wiele skuteczniejszą metodą jest wyznaczenie potrzebnych parametrów **na drodze symulacji statycznych charakterystyk sterowania dla określonej konfiguracji pracy tranzystora**. Sposób definiowania oraz określania poszczególnych parametrów małosygnałowych ilustruje Rys. 9.

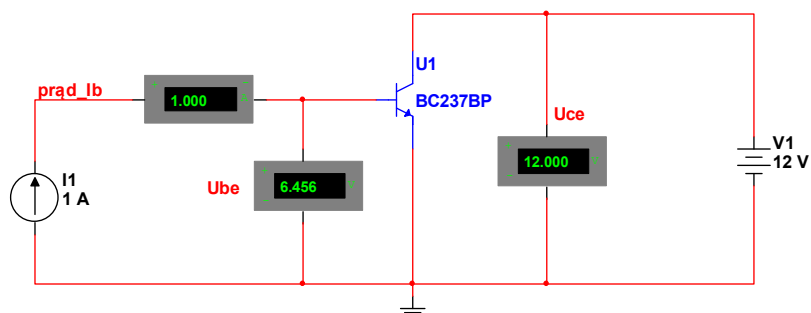


Rys. 9. Wyznaczanie wartości elementów modelu z parametrami h dla tranzystora pracującego z małym sygnałem w konfiguracji WE w oparciu o jego charakterystyki statyczne

$$h_{11} = \tan \alpha_{11}, \quad h_{12} = \tan \alpha_{12},$$

$$h_{21} = \tan \alpha_{21}, \quad h_{22} = \tan \alpha_{22}, \quad Q - \text{punkt pracy}$$

Numeryczne badania charakterystyk statycznych tranzystora bipolarnego można przeprowadzić w układzie pokazanym na rysunku **Rys. 10**. Jest to układ WE (wspólny emiter). Na potrzeby symulacji wprowadzono tu pomocnicze punkty pomiarowe: „prąd Ib”, „Ube” oraz „Uce”.

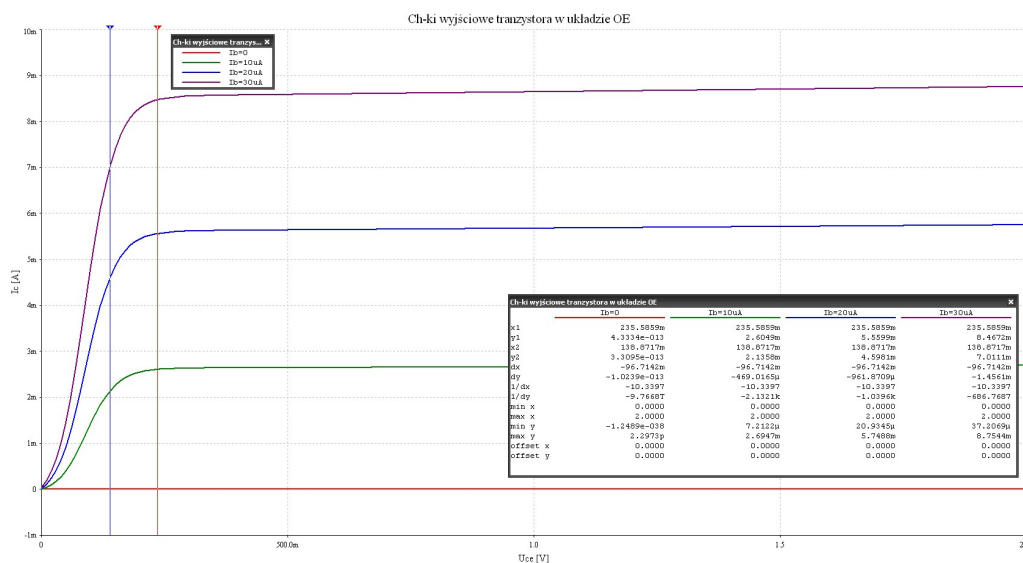


Rys. 10. Przykładowy układ do wyznaczania charakterystyk statycznych tranzystora w konfiguracji WE

Każdy z nich uzyskano klikając dwukrotnie w połączenie między komponentami. Zabieg ten miał na celu ułatwienie wyboru jednego z w/w parametrów jako podstawowego parametru symulacji. Nazwy źródła prądowego oraz napięciowego zostały ustawione domyślnie tj. kolejno „I1” oraz „V1”.

B. 1. SYMULACJE CHARAKTERYSTYK WYJŚCIOWYCH $I_C = f(U_{CE})$ DLA $I_B = \text{const}$

Charakterystyki wyjściowe tranzystora bipolarnego w układzie wspólnego emitera WE przedstawiają zmiany prądu kolektora (I_C) w funkcji zmian napięcia kolektor-emiter (U_{CE}). Charakterystyki te można wyznaczyć w podobny sposób jak w opisanym wcześniej przypadku dotyczącym charakterystyk wejściowych.



Rys. 11. Przebieg charakterystyk wyjściowych tranzystora w układzie WE

Ponownie należy więc uruchomić symulację klikając *Simulate* → *Analyses* → *DC Sweep*. Wielkością wejściową będzie teraz U_{CE} („Source 1”) w zakresie od 0 – 2V, przy zmianach prądu I_B („Source 2”) co 10uA w granicach 0 – 30uA. Otrzymane ch-ki prezentuje **Rys. 11**.

Na podstawie otrzymanych charakterystyk można obliczyć parametr małosygnałowy tranzystora h_{22} . Parametr ten

jest definiowany następującą zależnością $h_{22} = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}} \right|_{I_b = \text{const}}$. W celu dokładnego wyznaczenia przyrostów ΔI_C

(y1-y2) oraz ΔU_{CE} (x1-x2) można wykorzystać wyniki symulacji zamieszczone w tabeli (**Rys. 12.**)

Ch-ki wyjściowe tranzystora w układzie OE				
	I _b =0	I _b =10μA	I _b =20μA	I _b =30μA
x1	235.5859m	235.5859m	235.5859m	235.5859m
y1	4.3334e-013	2.6049m	5.5599m	8.4672m
x2	138.8717m	138.8717m	138.8717m	138.8717m
y2	3.3095e-013	2.1358m	4.5981m	7.0111m
dx	-96.7142m	-96.7142m	-96.7142m	-96.7142m
dy	-1.0239e-013	-469.0165μ	-961.8709μ	-1.4561m
1/dx	-10.3397	-10.3397	-10.3397	-10.3397
1/dy	-9.7668T	-2.1321k	-1.0396k	-686.7687
min x	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
max x	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000
min y	-1.2489e-038	7.2122μ	20.9345μ	37.2069μ
max y	2.2973p	2.6947m	5.7488m	8.7544m
offset x	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
offset y	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

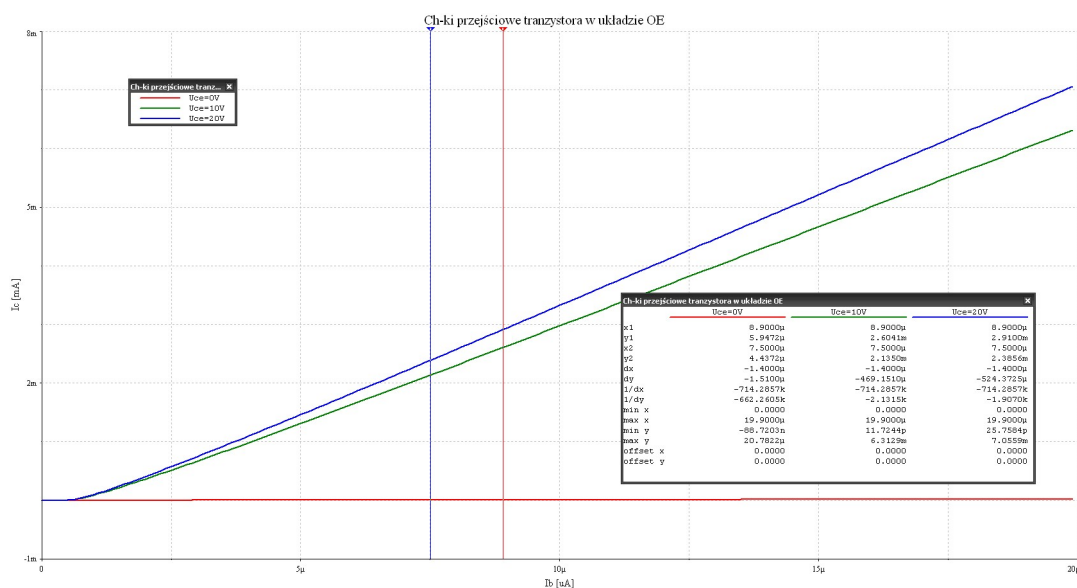
Rys. 12. Wyniki symulacji charakterystyki wyjściowej badanego tranzystora w układzie WE

Przykładową wartość parametru h_{22} wyznaczono dla prądu $I_b = 10 \mu A$

$$h_{22} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}} = \frac{2,605mA - 2,136mA}{235,586mV - 138,8717mV} = \frac{0,469mA}{96,7143mV} = 4,85mS$$

B. 2. SYMULACJE CHARAKTERYSTYK PRZEJŚCIOWYCH $I_C = f(I_B)$ DLA $U_{CE} = const$

Charakterystyki przejściowe tranzystora bipolarnego w układzie wspólnego emitera WE określają zmiany prądu kolektora (I_C) w funkcji zmian prądu bazy (I_B). Również i te charakterystyki można wyznaczyć w identyczny sposób jak dwie poprzednie. Wielkością wejściową będzie teraz I_B („Source 1”) zmieniający od 0 – 30μA, przy zmianach prądu U_{CE} („Source 2”) co 10V w granicach 0 – 20V. Przykładowe charakterystyki ilustruje (Rys. 13.):



Rys. 13. Przebieg charakterystyk przejściowych badanego tranzystora w układzie WE

Przyjmując bardzo uproszczoną zależność prądu kolektora od napięć polaryzujących tranzystor można sprawdzić jak zmienia się współczynnik β w tym tranzystorze w zależności od przepływających przez niego prądów bazy (I_B) oraz kolektora (I_C). Korzystamy w tym celu z zależności $\beta = \frac{I_C}{I_B}$. Na wykresie widocznym na Rys.

13 zaznaczono kursor nr 1 kolorem czerwonym (pionowa linia) i odczytując z tabelki wyników (patrz Rys. 14) dla tego kursora $x1 = I_B$ oraz $y1 = I_C$ można obliczyć przybliżoną wartość wzmocnienia prądowego β

Ch-ki przejściowe tranzystora w układzie OE			
	U _{ce} =0V	U _{ce} =10V	U _{ce} =20V
x1	8.9000μ	8.9000μ	8.9000μ
y1	5.9472μ	2.6041m	2.9100m
x2	7.5000μ	7.5000μ	7.5000μ
y2	4.4372μ	2.1350m	2.3856m
dx	-1.4000μ	-1.4000μ	-1.4000μ
dy	-1.5100μ	-469.1510μ	-524.3725μ
1/dx	-714.2857k	-714.2857k	-714.2857k
1/dy	-662.2605k	-2.1315k	-1.9070k
min x	0.0000	0.0000	0.0000
max x	19.9000μ	19.9000μ	19.9000μ
min y	-88.7203n	11.7244p	25.7584p
max y	20.7822μ	6.3129m	7.0559m
offset x	0.0000	0.0000	0.0000
offset y	0.0000	0.0000	0.0000

Rys. 14. Wyniki symulacji charakterystyki przejściowej badanego tranzystora w układzie WE

Korzystając z wyników opisanej tu symulacji można też obliczyć parametr małosygnałowy tranzystora h_{21} związany z opisaniem powyżej współczynnikiem wzmocnienia prądowego β . Na podstawie modelu z parametrami h można zapisać: $h_{21} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \Big|_{U_{CE}=const}$. Wartości ΔI_C (y1-y2) oraz ΔI_B (x1-x2) odczytujemy np dla napięcia $U_{CE}=10V$ co prowadzi do zależności:

$$h_{21} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{2,6041mA - 2,135mA}{8,9\mu A - 7,5\mu A} = \frac{0,4691mA}{1,4\mu A} = 335$$

Postępując podobnie w stosunku do innych charakterystyk z rodziny można zbadać jak zależy ten parametr od napięcia U_{CE} , które jest składową punktu pracy tranzystora.

C. OBLICZENIA WSTĘPNE I PROJEKTOWE

Obliczyć takie wartości elementów R_C i C_2 wzmacniacza przedstawionego na Rys.2, aby napięciowe wzmocnienie skuteczne (k_{uf0}) oraz dolna częstotliwość graniczna ($f_{d\beta}$) tego układu były zawarte w przedziałach określonych w Tabelcy 1. Można wybrać dowolną kombinację przedziałów k_u oraz $f_{d\beta}$.

Tabela 1

k_u , V/V	9 ÷ 11	14 ÷ 17	22 ÷ 27	36 ÷ 44	58 ÷ 70	90 ÷ 100
$f_{d\beta}$, Hz	25 ÷ 30	30 ÷ 36	50 ÷ 60	90 ÷ 100	150 ÷ 180	200 ÷ 240

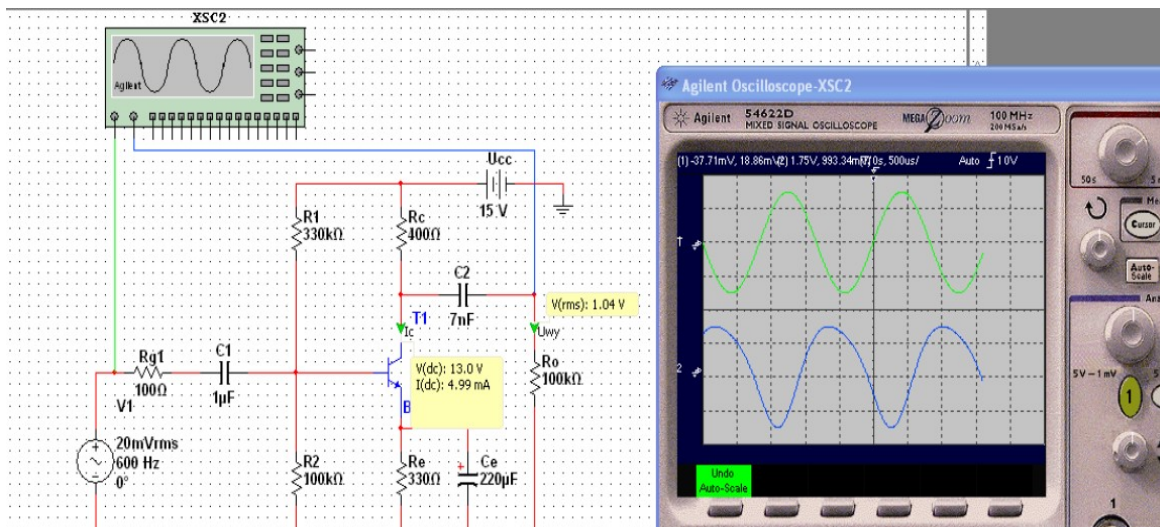
Przyjąć punkt pracy dla tranzystora bipolarnego $n-p-n$ przydzielonego przez prowadzącego (BC 338, BC 237, BC 107, BD139, BD 140, BD176, BDP281) bazując na symulacjach opisanych w pkt. B instrukcji.

D. SYMULACJE WZMACNIACZA WE

D. 1. URUCHOMIENIE PROJEKTU SYMULACJI

Po przeprowadzeniu wstępnych obliczeń projektowych następuje ich weryfikacja poprzez symulacje działania układu. W celu ich przeprowadzenia należy pobrać i uruchomić projekt o nazwie „wzmacniacz WE” i uruchomić go w środowisku Multisim. Następnie dopasować projekt do założeń wstępnych oraz wyników obliczeń analitycznych zrealizowanych w p. 3 instrukcji. W tym celu należy zmienić model elementu aktywnego (tranzystora) na właściwy (przydzielony przez prowadzącego) oraz wpisać obliczone wartości elementów schematu. Po dokonaniu powyższych zmian uruchomić symulator (opcja *Simulate - Run*) i dokonać obserwacji przebiegów sygnału na wejściu i wyjściu układu używając wybranego modelu wirtualnego oscyloskopu, tak jak pokazano na Rys. 15, gdzie kolorem zielonym oznaczono przebieg napięcia wejściowego a kolorem niebieskim wyróżniono przebieg napięcia na wyjściu układu (obciążeniu). W trakcie obserwacji należy zwrócić uwagę na odpowiednią amplitudę i częstotliwość sygnału wejściowego (małe wartości) oraz właściwą odpowiedź wzmac-

niacza (odwrócony i wzmacniony sygnał na obciążeniu). W przypadku zniekształconej odpowiedzi układu zmniejszyć empirycznie amplitudę sygnału wejściowego do wartości umożliwiającej prawidłową transformację i wzmacnienie sygnału na wyjściu.

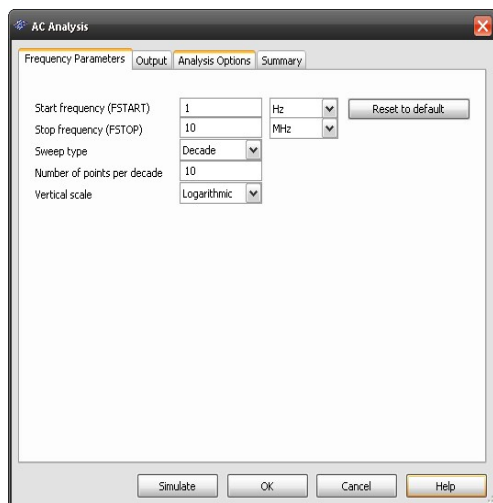


Rys.15. Symulacje działania zaprojektowanego wzmacniacza WE

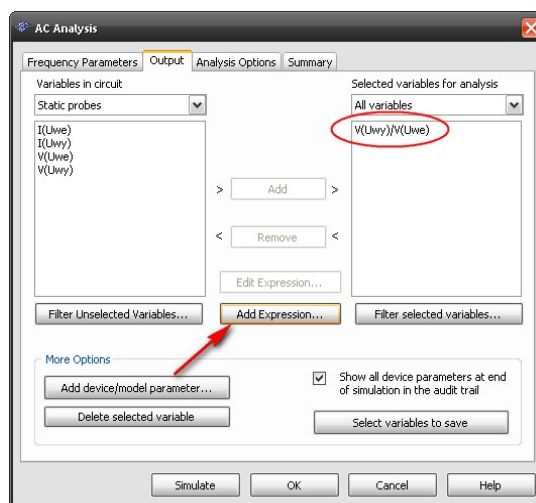
W kolejnym etapie należy oszacować wartość wzmacnienia napięciowego układu k_u dla wybranej częstotliwości z zakresu śr.cz. (np. 600 Hz) poprzez pomiar napięć skutecznych U_{RMS} przebiegów na wejściu i wyjściu układu wykorzystując wirtualny oscyloskop lub sondy pomiarowe ustawione w odpowiednich punktach układu (patrz Rys. 15). W przypadku niezgodności wartości wzmacnienia k_u z założeniami projektu dokonać weryfikacji punktu pracy bazując na zależności (1) starając się uzyskać wartość zbliżoną z obliczeniami. Wykonać kopię ekranu potwierdzającą poprawne działanie układu i dołączyć do sprawozdania z ćwiczenia opatrując ją odpowiednim komentarzem.

D. 2. SYMULACJE CHARAKTERYSTYK CZĘSTOTLIWOŚCIOWYCH

Po weryfikacji poprawności działania układu można dokonać symulacji jego charakterystyk częstotliwościowych. W tym celu należy użyć ścieżki *Simulate* → *Analyses* → *AC Analysis* i przejść do ustawień parametrów tej symulacji. W podanym przykładzie obliczenia przeprowadzono w zakresie od 1Hz – 10MHz. Symulowanym parametrem wyjściowym układu było wzmacnienie napięciowe, które otrzymano poprzez wpisanie wyrażenia $V(U_{wy})/V(U_{we})$ do zakładki *Output* w pole *Selected variables for analysis* za pomocą opcji *Add Expression*. Powyższe ustawienia obrazują rysunki poniżej (patrz Rys.16 i Rys.17).

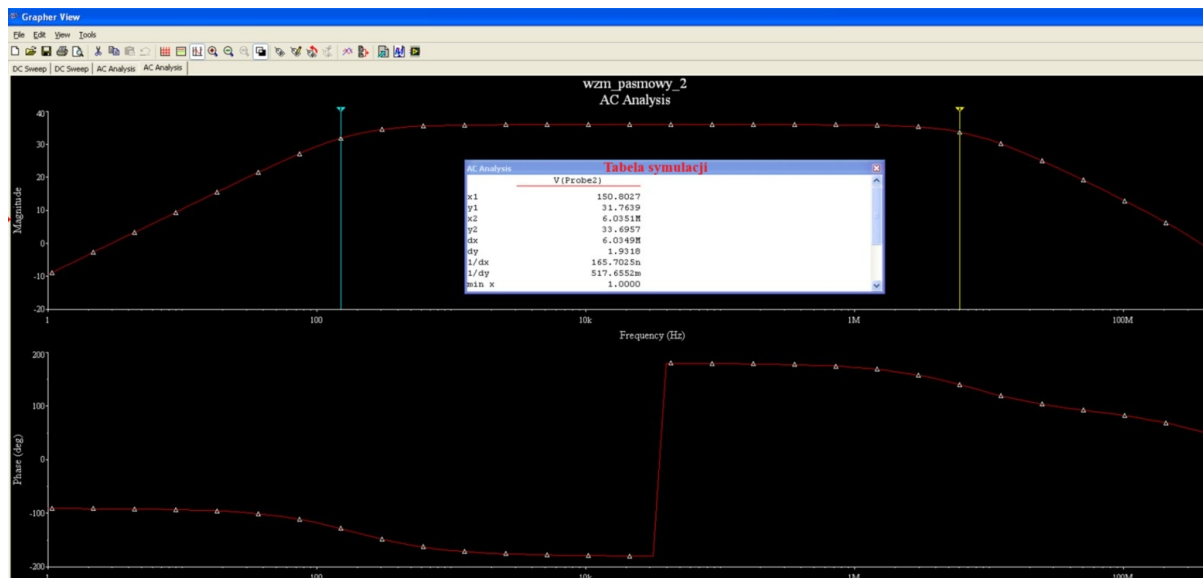


Rys. 16. Zakładka „Frequency Parameters” analizy „AC Analysis” wraz z ustawieniami



Rys. 17. Zakładka „Output” analizy „AC Analysis” wraz z ustawieniami

Wykorzystując kursory i dokładne dane widoczne w tabeli symulacji (patrz **Rys. 18**) obliczyć (**bazując na definicji**) wartości dolnej częstotliwości granicznej f_{dp} . W przypadku dużej rozbieżności z założeniem projektowym dokonać jej weryfikacji poprzez zmianę wartości pojemności C_2



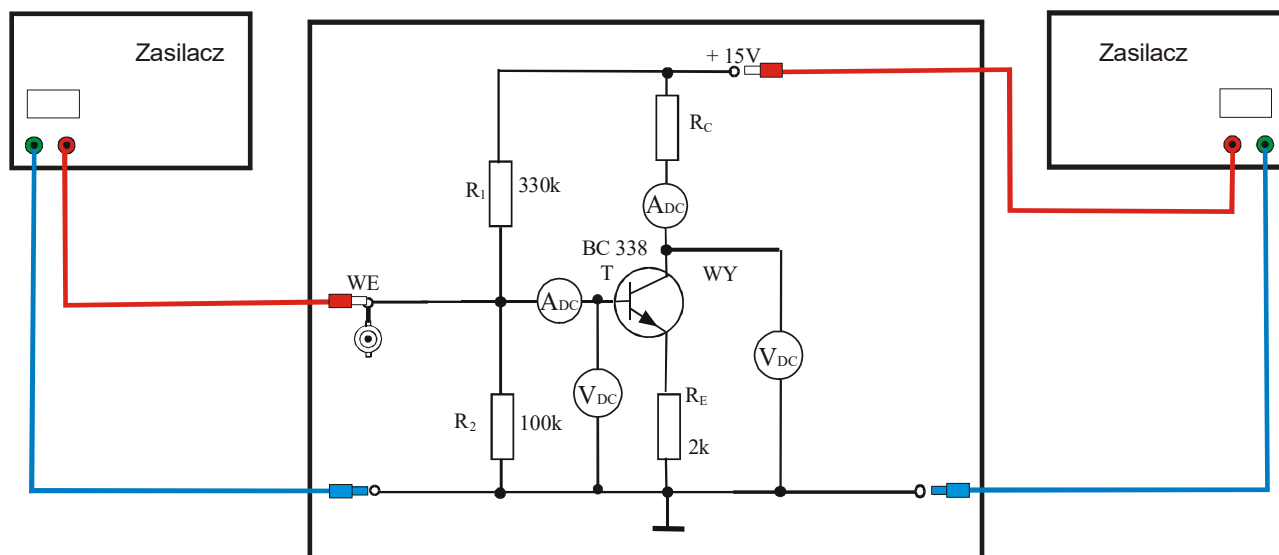
Rys.18. Symulacje charakterystyk częstotliwościowych wzmacniacza WE

Wykonać kopię ekranu zawierającą zasymulowane wykresy charakterystyk częstotliwościowych i dołączyć ją do sprawozdania z ćwiczenia opatrując odpowiednim komentarzem.

E. POMIARY ZAPROJEKTOWANEGO UKŁADU WZMACNIACZA WE.

E. 1. BADANIE CHARAKTERYSTYKI PRZEJŚCIOWEJ I WPLYWU PUNKTU PRACY TRANZYSTORA NA PARAMETRY MAŁOSYGNAŁOWE

- Połączyć tranzystor z elementami ustalającymi jego punkt pracy (oporniki R_1, R_2, R_C, R_E .) a następnie dołączyć źródła napięcia stałego według schematu przedstawionego na **Rys 19**.



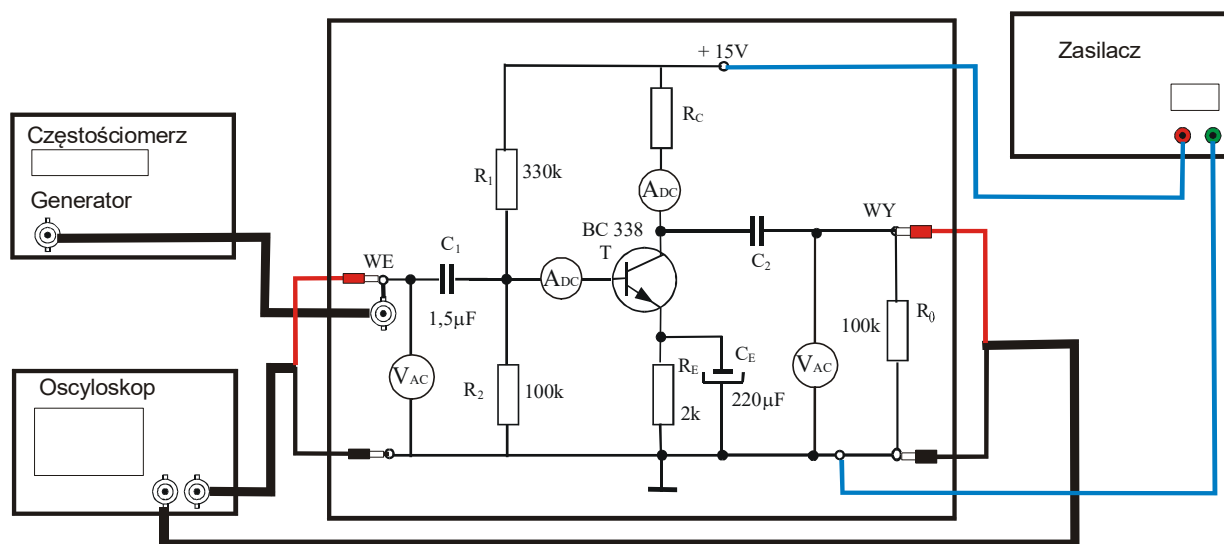
Rys.19. Układ do badania charakterystyki przejściowej i wpływu punktu pracy tranzystora na parametry małosygnałowe i właściwości wzmacniające.

- Sprawdzić i ewentualnie skorygować ustalone w projekcie wartości punktu pracy tranzystora. Korekcji można dokonać poprzez odpowiednią zmianę oporności wybranego rezystora polaryzującego tranzystor.

- Wyznaczyć charakterystykę przejściową wzmacniacza $U_{WY} = f(U_{WE})$.
- Zbadać wpływ punktu pracy na parametry małosygnałowe tranzystora (współczynnik wzmocnienia prądowego h_{21e}).

E. 2. POMIAR WZMOCNIENIA I PASMA JEDNOSTOPNIOWEGO WZMACNIACZA WE

Po wmontowaniu elementów pojemnościowych (kondensatory C_1 , C_2 , C_E) należy zmierzyć zależność wzmocnienia napięciowego (k_u) od częstotliwości (f) układu wzmacniacza w konwencjonalny sposób. Do pomiaru napięć U_{we} i U_{wy} należy wykorzystać woltomierz cyfrowy i oscyloskop (Rys. 20).



Rys.20. Układ do badania charakterystyki częstotliwościowej (pasmowej) wzmacniacza

Podczas pomiarów należy tak dobrać amplitudę napięcia sinusoidalnego z generatora w zależności od użytego tranzystora, tak aby sygnał wyjściowy nie był zniekształcony (zazwyczaj to ok 100 mV), co zapewnia spełnienie warunku małosygnałowej pracy wzmacniacza. Pomiarów k_{ueff} należy dokonać przy częstotliwości środkowej pasma wzmacniacza, którą należy ustalić eksperymentalnie.

F. OPRACOWANIE WYNIKÓW

1. Przedstawić i opisać wyniki symulacji charakterystyk statycznych tranzystora (ocena 3.0)
2. Przedstawić i opisać obliczenia wstępne i projektowe (ocena 3.0)
3. Wyznaczyć na podstawie symulacji charakterystyk statycznych parametry małosygnałowe tranzystora (ocena 3.0)
4. Przedstawić i opisać wyniki symulacji projektu wzmacniacza WE (ocena 3.0)
5. Wykreślić zmierzoną charakterystykę przejściową wzmacniacza (ocena 3.0)
6. Wyjaśnić dlaczego charakterystyka przejściowa wzmacniacza poza środkowym zakresem jest płaska (ocena 3.5)
7. Wykreślić zmierzone zależności h_{21} i g_m od punktu pracy (ocena 3.5)
8. Bazując na zależnościach h_{21} i g_m od punktu pracy wyjaśnić wpływ punktu pracy na właściwości wzmacniające układu WE (ocena 4.0)
9. Narysować zmierzoną charakterystykę częstotliwościową wzmacniacza, określić maksymalne wzmocnienie k_{Umax} oraz pasmo przenoszenia układu (ocena 4.0)
10. Porównać wyniki pomiarów z założonymi wartościami wzmocnienia k_u i dolnej częstotliwości granicznej $f_{d\beta}$ oraz podać przyczyny ich ewentualnych odchyłek, dokonać weryfikacji poprzez symulacje MS (ocena 4.5)
11. Na podstawie danych katalogowych tranzystora wykorzystanego w ćwiczeniu obliczyć wartość górnej częstotliwości granicznej $f_{g\beta}$ układu i w przypadku niezgodności wyniku z pomiarem podać jej przyczyny oraz zaproponować ewentualne zmiany w modelu MS, celem lepszego dopasowania do otrzymanych pomiarów (ocena 5.0)