

Wydział	Imię i nazwisko		Rok	Grupa	Zespół
WFiIS	1. Michał Rogowski 2. Ihnatsi Yermakovich		II	10	02
PRACOWNIA ELEKTRONICZNA WFiIS AGH	Temat				Nr ćwiczenia
	Charakterystyki tranzystora i wzmacniacz w układzie WE				05
Data wykonania	Data oddania	Zwrot do poprawy	Data oddania	Data zaliczenia	OCENA
12.05.2022	26.05.2022				

Charakterystyki tranzystora i wzmacniacz w układzie WE

Ćwiczenie nr 05

Michał Rogowski

Ihnatsi Yermakovich

1	Cel ćwiczenia	2
2	Przebieg ćwiczenia	2
3	Wyniki	2
3.1	Charakterystyki tranzystora bipolarnego	2
3.1.1	Charakterystyki wejściowa i przejściowa	2
3.1.2	Charakterystyka wyjściowa	7
3.2	Projektowanie wzmacniacza w układzie WE	12
3.3	Budowa i pomiar punktów pracy wzmacniacza w układzie WE	13
3.4	Charakterystyka częstotliwościowa wzmacniacza w układzie WE	14
3.4.1	Wyznaczenie offsetu sygnału wyjściowego	14
3.4.2	Charakterystyka częstotliwościowa wzmacniacza	15

1 Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia było zaprojektowanie wzmacniacza jedno-tranzystorowego ze zdegenerowanym emiterem na podstawie przedstawionych parametrów i wyznaczenie jego charakterystyki amplitudowej.

2 Przebieg ćwiczenia

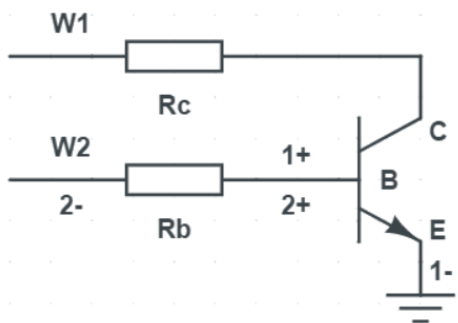
Pomiarów dokonywaliśmy wykorzystując wielofunkcyjne urządzenie laboratoryjne Analog Discovery 2 (AD2), którym sterowaliśmy z poziomu aplikacji WaveForms. Badane układy tworzyliśmy na płytce stykowej urządzenia AD2. W punkcie 4 podczas tworzenia bardziej rozbudowanego układu powstała potrzeba użycia zewnętrznego generatora, z czego od razu wnioskujemy, że AD2 ma swoje ograniczenia i nie może zastąpić wszystkich dotychczas używanych urządzeń.

3 Wyniki

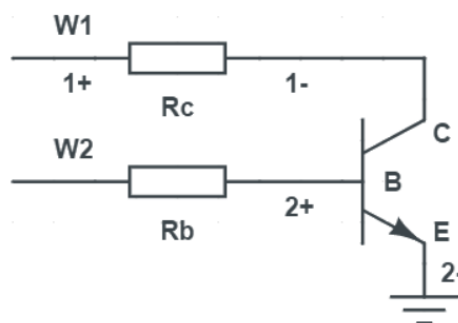
3.1 Charakterystyki tranzystora bipolarnego

Naszym zadaniem było wyznaczenie charakterystyk (wejściowej, przejściowej i wyjściowej) tranzystora BC547 (n-p-n) korzystając z analizatora półprzewodników (Tracer) dostępnego w aplikacji WaveForms. W opcjach wybraliśmy pomiary bez dedykowanego adaptera (No Adapter) oraz typ tranzystora NPN. Do kolektora dołączyliśmy rezystor szeregowy $R_C = 100\ \Omega$, a do bazy rezystor $R_B = 10\ k\Omega$. We wszystkich symulacjach użyliśmy tranzystora BC547BP ze współczynnikiem wzmocnienia prądowego równym 300 dostępnym w bibliotece elementów symulatora Qucs.

3.1.1 Charakterystyki wejściowa i przejściowa



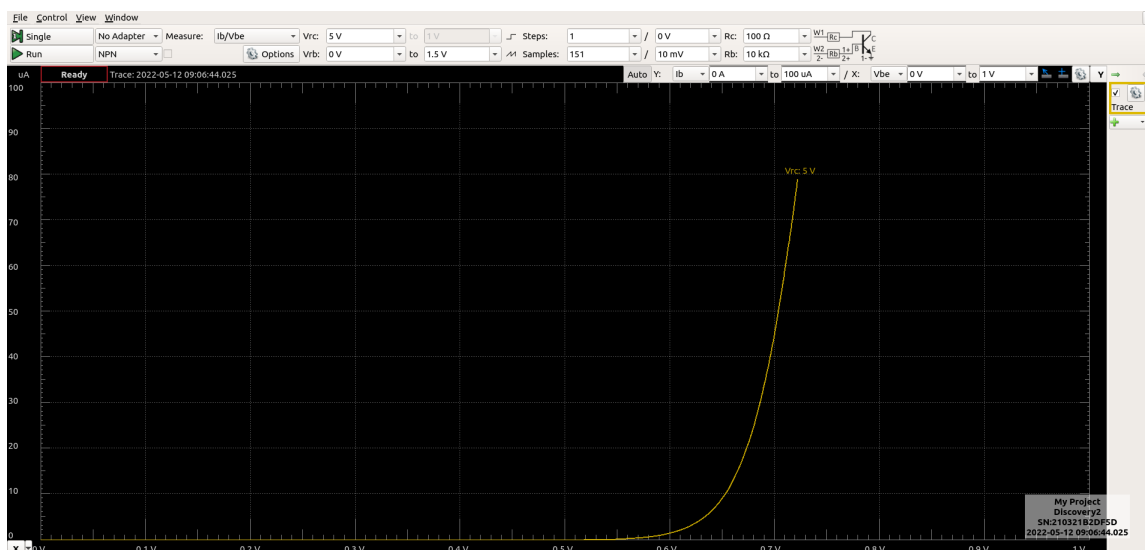
Rysunek 1: Układ dla wyznaczania charakterystyki wejściowej



Rysunek 2: Układ dla wyznaczania charakterystyki przejściowej

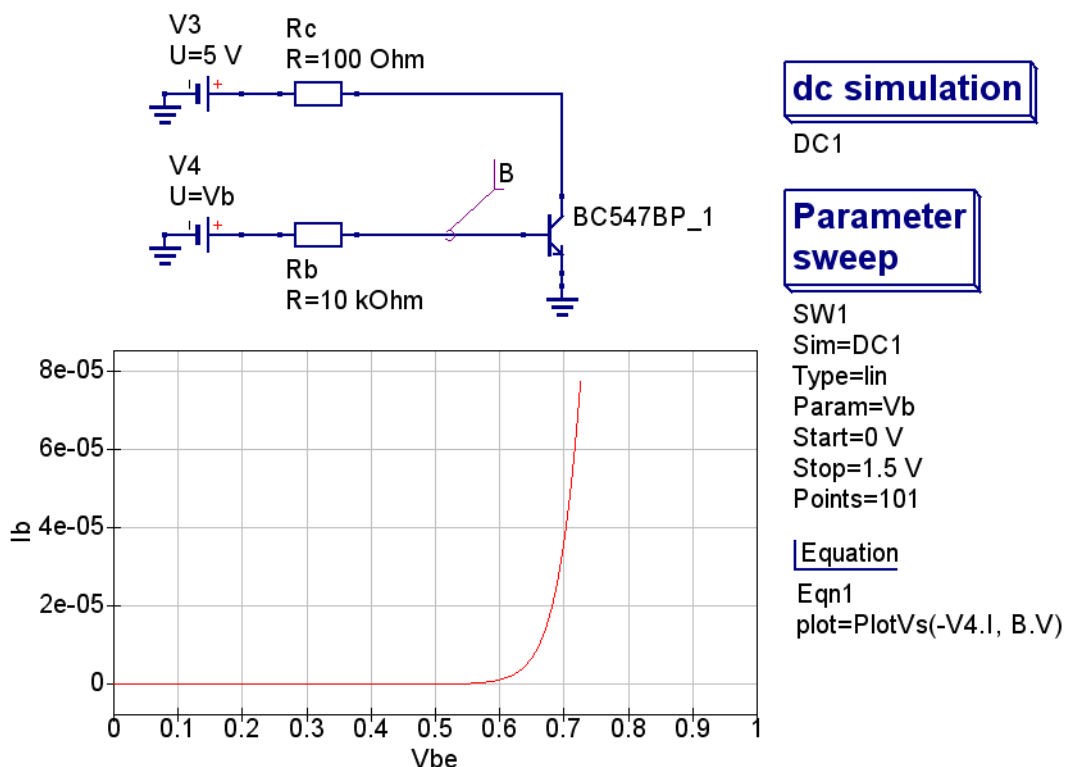
Najpierw ustawiliśmy opcje pomiaru w aplikacji WaveForms następująco: ilość kroków (Steps) na 1, napięcie V_{RC} na 5V, zakres napięcia V_{RB} na 0V – 1.5V.

Następnie skonfigurowaliśmy układ tak, jak pokazane na schemacie 1 (rys. 1) i dokonaliśmy pomiaru charakterystyki wejściowej tranzystora BC547:



Rysunek 3: Charakterystyka wejściowa tranzystora BC547

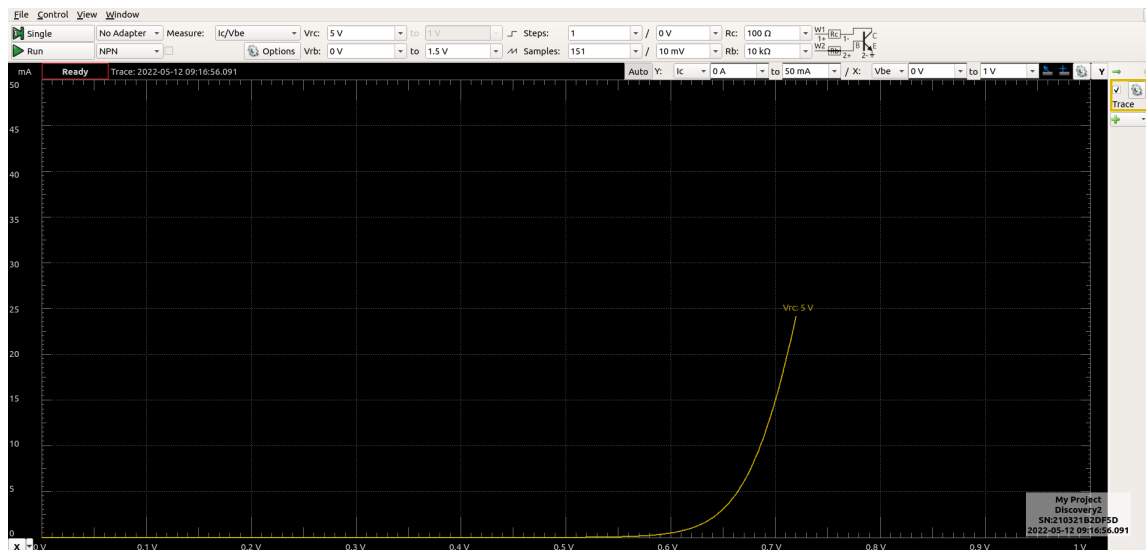
W celu weryfikacji kształtu otrzymanej charakterystyki dokonaliśmy symulacji podobnego tranzystora. Zwróćmy uwagę, że chociaż charakterystyki są podobne, tranzystor z biblioteki może mieć inne parametry od tego, co mieliśmy na ćwiczeniu (np. współczynnik wzmocnienia prądowego pierwotnie wynosił 400, ale w poniższej symulacji jest ustawiony na 300).



Rysunek 4: Wymulowana charakterystyka wejściowa tranzystora BC547

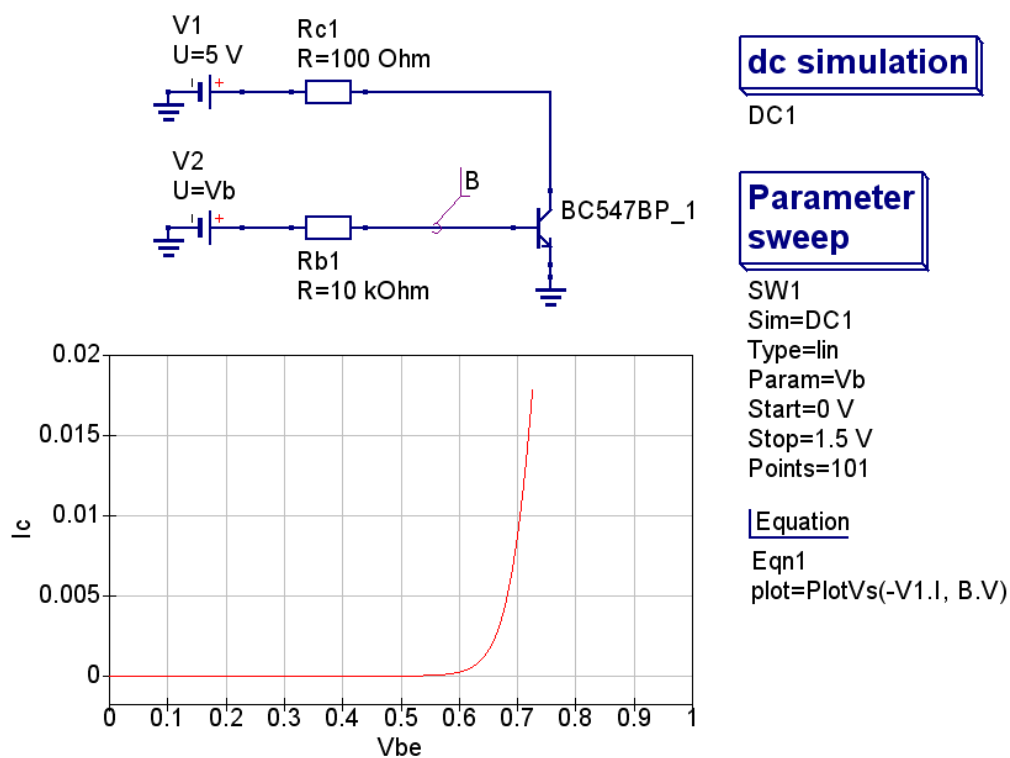
Zauważmy bardzo dużą zbliżoność charakterystyki teoretycznej do rzeczywistej.

Teraz dokonamy podobnych kroków w celu wyznaczenia charakterystyki przejściowej tranzystora, dlatego skonfigurowaliśmy układ tak, jak jest pokazane na schemacie 2. (rys. 2), a następnie dokonaliśmy pomiaru:



Rysunek 5: Charakterystyka przejściowa tranzystora BC547

W celu wyznaczenia teoretycznej charakterystyki przejściowej dokonamy symulacji. Uwaga przy poprzedniej symulacji pozostaje słuszna i teraz, a wynik jest przedstawiony poniżej:



Rysunek 6: Wymulowana charakterystyka przejściowa tranzystora BC547

Widzimy, że chociaż kształt krzywej jest podobny, wartości opisujące ją się różnią. Spowodowane to może być powyżej wspomnianymi różnicami w charakterystykach tranzystorów.

Teraz przejdziemy do wyznaczania zależności rezystancji r_{be} w funkcji prądu kolektora I_C oraz transkonduktancji g_m w funkcji V_{be} z definicji oraz wzoru małosygnałowego. Zgodnie z zaleceniem do pisania sprawozdań, nie umieszczamy tutaj zebranych wyników, bo są one zbyt obszerne.

Najpierw policzymy z definicji rezystancję r_{be} następująco:

$$r_{be} = \frac{dU_{BE}}{dI_B} \quad (1)$$

A następnie stosując wzór małosygnałowy:

$$r_{be} \approx \frac{\beta}{g_m} \approx \frac{V_T}{I_B} \quad (2)$$

Gdzie V_T jest potencjałem termicznym:

$$V_T = \frac{kT}{q_e} = 0,3645 \text{ (V)} \quad (3)$$

gdzie:

k - stała Boltzmanna.

T - temperatura złącza (jest parametrem tranzystora).

q_e - ładunek elementarny elektronu.

A teraz znajdziemy transkonduktancję g_m z definicji:

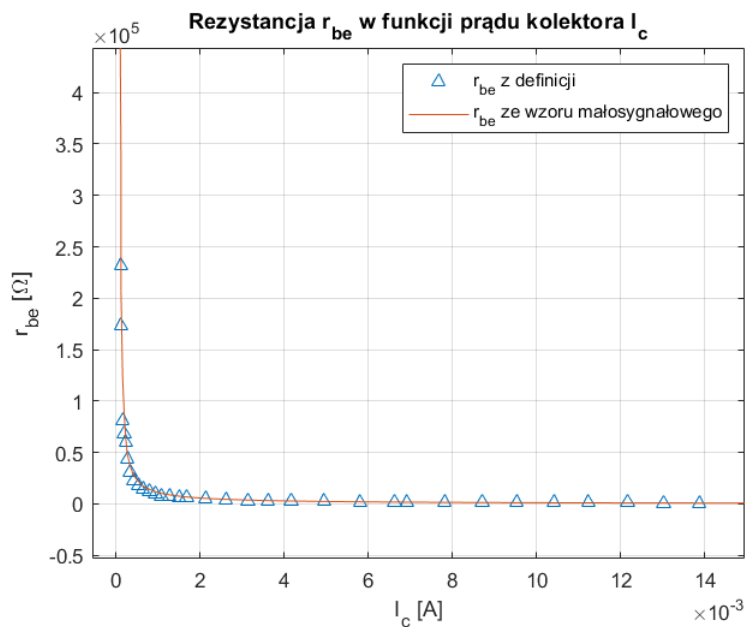
$$g_m = \frac{dI_C}{dU_{BE}} \quad (4)$$

A następnie stosując wzór małosygnałowy:

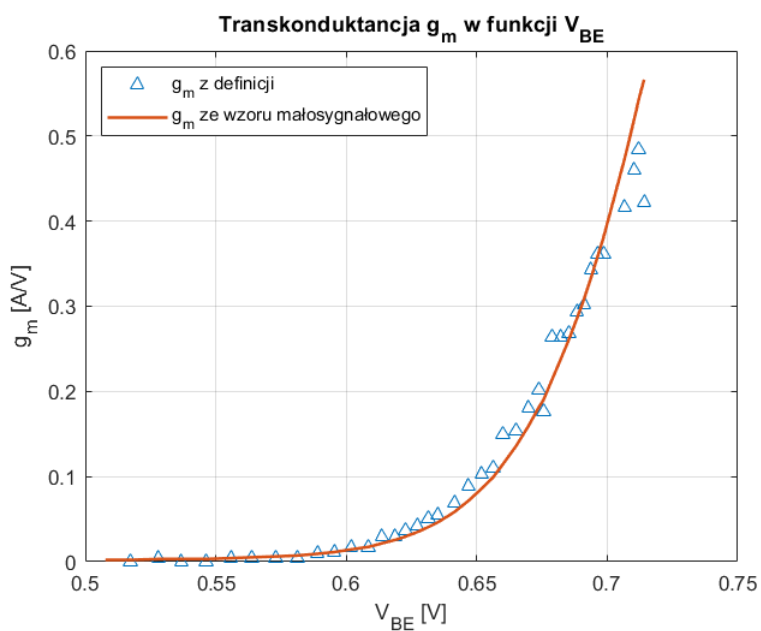
$$g_m \approx \frac{I_C}{V_T} \quad (5)$$

Gdzie V_T jest potencjałem termicznym, o którym wspomnieliśmy wcześniej.

Wyniki wyznaczenia obydwu zależności są zaprezentowane poniżej:



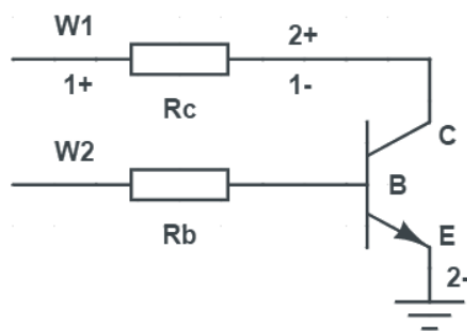
Rysunek 7: Zależność rezystancji r_{be} w funkcji prądu kolektora



Rysunek 8: Zależność transkonduktancji w funkcji napięcia baza-emiter

Ze względu na fakt, że otrzymaliśmy bardzo zbliżone charakterystyki widzimy jak dobrze sprawdzają się wzory małosygnałowe, które są prostsze w zastosowaniu niż obliczenia z definicji.

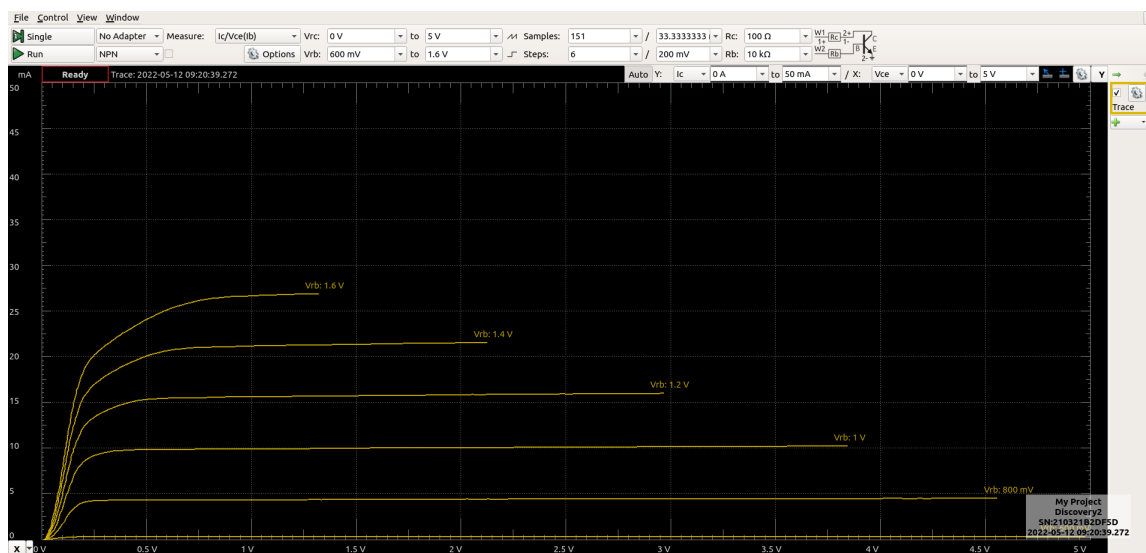
3.1.2 Charakterystyka wyjściowa



Rysunek 9: Schemat filtru dolnoprzepustowego I rzędu

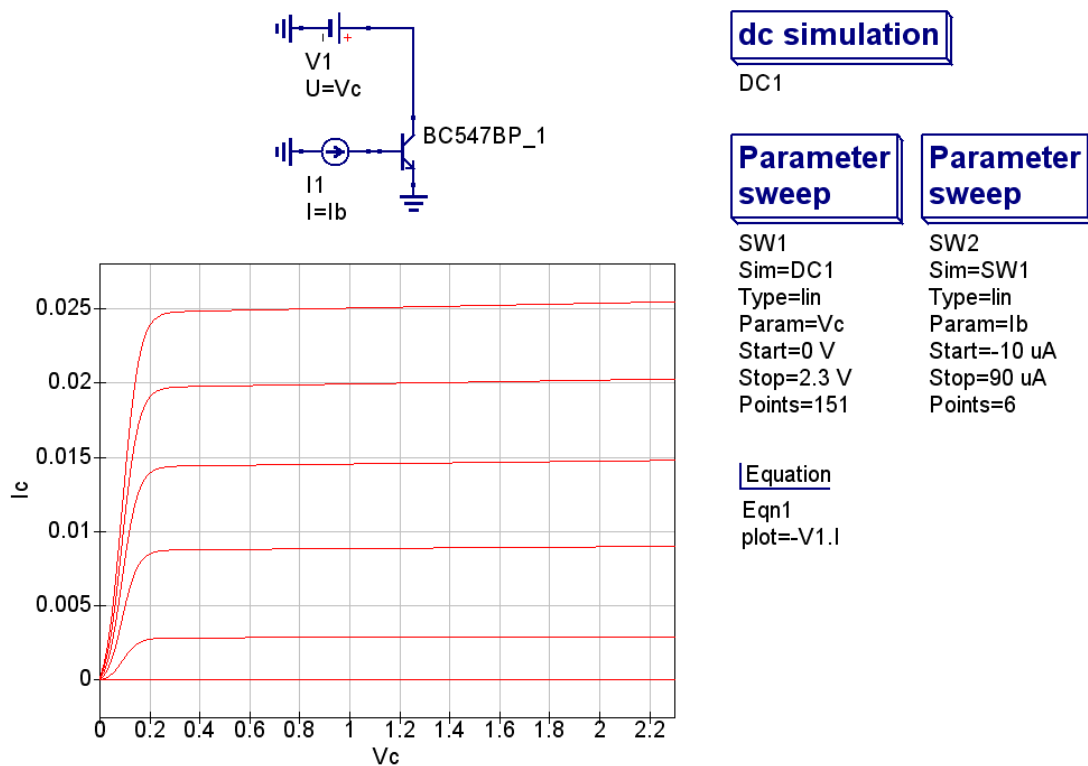
Najpierw ustawiliśmy opcje pomiaru w aplikacji WaveForms następująco: ilość kroków (Steps) na 6, zakres napięcia V_{RC} na $0V - 5V$, a zakres napięcia V_{RB} na $600mV - 1.6V$.

Następnie skonfigurowaliśmy układ tak, jak pokazane na schemacie 9 (rys. 9) i dokonaliśmy pomiaru charakterystyki wyjściowej tranzystora BC547:



Rysunek 10: Charakterystyka wejściowa tranzystora BC547

W celu wyznaczenia teoretycznej charakterystyki wyjściowej dokonamy symulacji. Uwaga przy poprzednich symulacjach pozostaje słusna i teraz, a wynik jest przedstawiony poniżej:

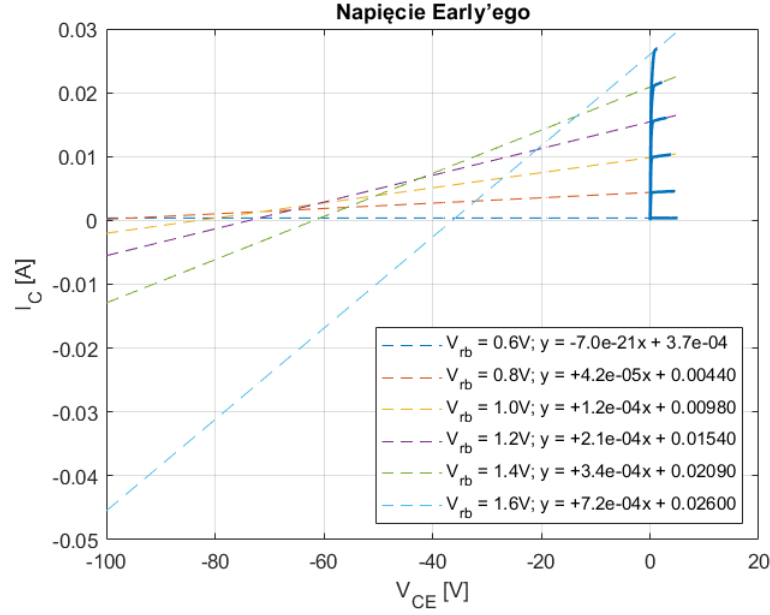


Rysunek 11: Wyszimulowana charakterystyka wyjściowa tranzystora BC547

Symulacja nie jest przeprowadzona 'wprost' ze względu na to, jak Qucs traktuje symulacje z kilkoma parametrami zależnymi jeden od drugiego. Natomiast zakresy V_c oraz I_b są dobrane tak, aby odzwierciedlać rzeczywisty układ.

Widzimy, że otrzymane charakterystyki są podobne.

Teraz wyznaczmy napięcie Early'ego dla każdej ze zmierzonych krzywych:



Rysunek 12: Wyznaczenie napięcia Early'ego

Widzimy, że chociaż teoria mówi, że proste dopasowane do prostoliniowych odcinków charakterystyki wyjściowej przecinają się w jednym punkcie, jednak w przypadku rzeczywistym nie jest to prawdą i powstaje pewne 'widmo'. Dlatego dla każdej prostej podajemy wartość bezwzględną miejsca zerowego:

Tabela 1: Napięcie Early'ego dla poszczególnych krzywych

V_{rb} [V]	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6
V_A [V]	5,35E+16	104,51	83,51	73,67	61,80	36,35

Widzimy, że dla napięcia 0.6V wyszła nam zbyt duża wartość napięcia Early'ego ze względu na poziomą charakterystykę. Wartość 36.35V też może wywoływać wątpliwości, ze względu na to, że oczekiwana wartość napięcia Early'ego dla rzeczywistego bipolarnego tranzystora leży w przedziale 50V - 250V.

Mając powyższe dane możemy wyznaczyć i narysować zależności rezystancji r_{ce} w funkcji prądu kolektora I_C z definicji oraz wzoru małosygnałowego:

Najpierw policzymy z definicji rezystancję r_{ce} następująco:

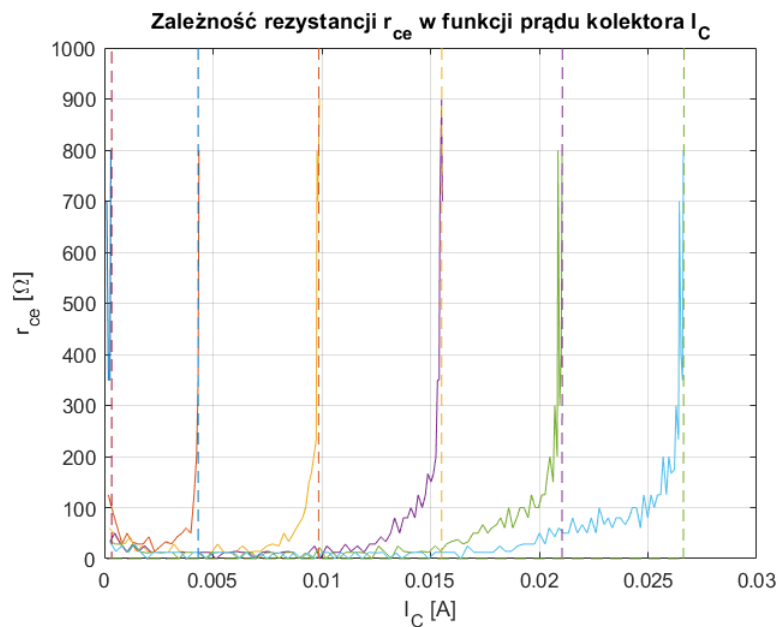
$$r_{ce} = \frac{dV_{CE}}{dI_C} \quad (6)$$

A następnie stosując wzór małosygnałowy:

$$r_{ce} \approx \frac{V_A}{I_C} \quad (7)$$

Gdzie V_A jest napięciem Early'ego.

Wyznaczoną charakterystykę umieszczamy poniżej:



Rysunek 13: Zależność rezystancji r_{ce} w funkcji prądu kolektora I_C

Poszczególne krzywe na wykresie od lewej do prawej pokazują rezystancję r_{ce} dla napięć V_{rb} odpowiednio z zakresu: 0.6V - 1.6V. Kursywem są zaznaczone charakterystyki otrzymane korzystając ze wzoru małosygnałowego.

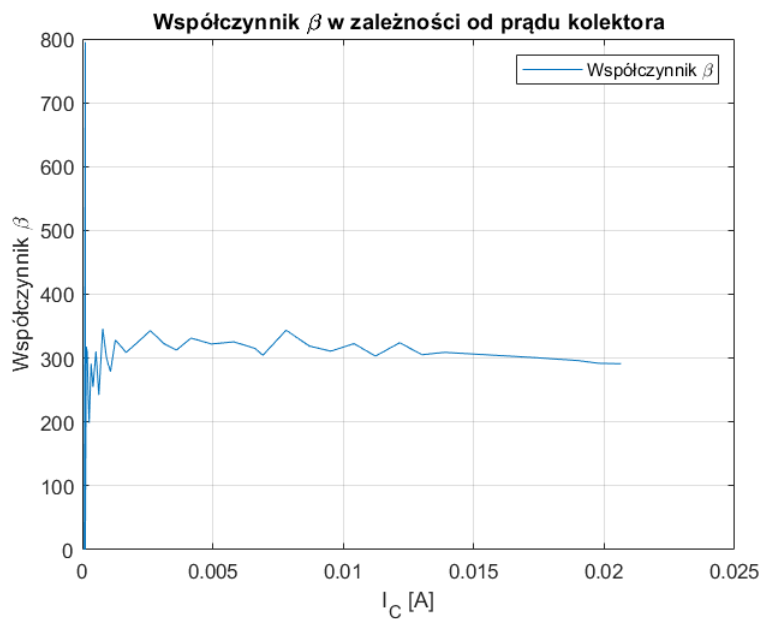
Zauważmy, że wzory małosygnałowe sprawdzają się dobrze, chociaż istnieją pewne różnice przy małych wartościach r_{ce} .

Przy dokonywaniu pomiaru aplikacja WaveForms nie zapisła wartości napięcia I_B , a więc w celu wyznaczenia zależności wsp. beta od prądu kolektora skorzystamy z danych zebranych w poprzednich punktach:

Wartości współczynnika beta został obliczony z definicji następująco:

$$\beta = \frac{dI_C}{dI_B} \quad (8)$$

A charakterystyka jest przedstawiona poniżej:

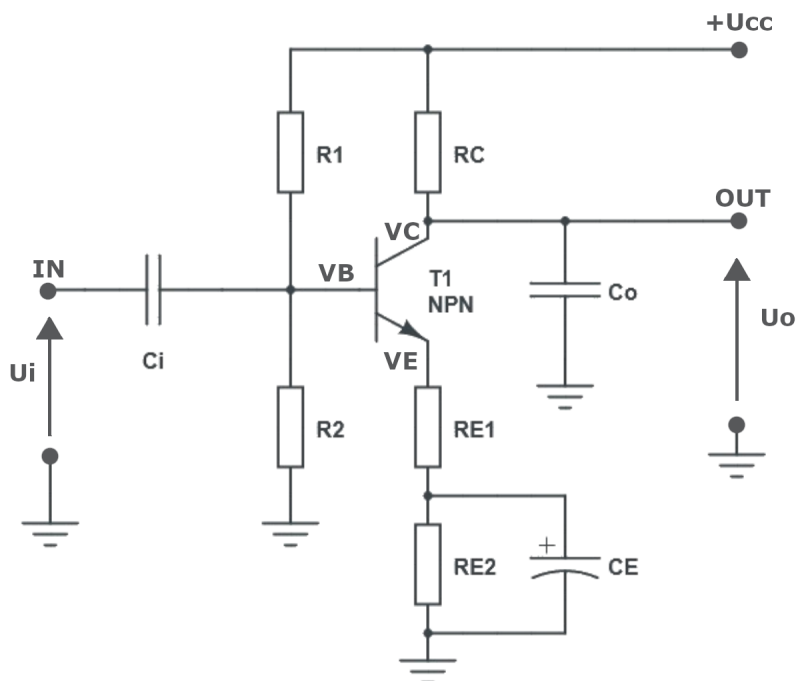


Rysunek 14: Zależność rezystancji r_{ce} w funkcji prądu kolektora I_C

Zauważmy, że wyszły nam wartości bardzo zbliżone do wartości teoretycznej 300. Zwróćmy uwagę, że dla bardzo małych prądów kolektora dochodzi do znacznych odchyień od oczekiwanej wartości β . Może to być między innymi spowodowane szumem śrutowym.

3.2 Projektowanie wzmacniacza w układzie WE

Naszym zadaniem było zaprojektowanie wzmacniacza jedno-tranzystorowego ze zdegenerowanym emiterem. Do zbudowania takiego układu potrzebowaliśmy wyznaczyć teoretyczne wartości komponentów układu dla danej wersji układu. Musieliśmy znaleźć odpowiednio wartości R_C , R_{E1} , R_{E2} , R_1 , R_2 , C_o oraz C_E .



Rysunek 15: Schemat wzmacniacza jedno-tranzystorowego

Do wyznaczenia potrzebnych wartości skorzystaliśmy z następujących danych:

Tabela 2: Wartości wejściowe podane w ćwiczeniu

L.p	U_{cc} [V]	I_C [mA]	β	K_u [V/V]	f_{g1} [kHz]	f_{g2} [kHz]	V_E [V]
2	12	2	300	-25	270	180	1,2

Ponadto zgodnie z opisem ćwiczenia przyjęliśmy, że $I_C \approx I_E$, prąd płynący przez dzielnik do polaryzacji bazy jest znacznie większy od prądu bazy tranzystora i równy $20 I_B$, napięcie $U_{BE} = 0,7V$, a wartość kondensatora $C_E = 470\mu F$.

Z powyższych danych łatwo znajdziemy wszystkie potrzebne wartości. Zaczniemy od I_B :

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = 6,67 \text{ (mA)} \quad (9)$$

Napięcie bazy znajdziemy następująco:

$$V_B = V_E + 0,7V = 2,7 \text{ (V)} \quad (10)$$

Obliczymy napięcie kolektora:

$$V_c = \frac{V_{cc} + V_E}{2} = 6,6 \text{ (V)} \quad (11)$$

Rezystancję opornika R_C wyznaczymy tak, jak pokazano poniżej:

$$R_c = \frac{V_{cc} - V_c}{I_c} = 1,9 \text{ (k}\Omega\text{)} \quad (12)$$

Określimy wartości R_1 i R_2 , które są potrzebne dla dzielnika napięcia, który z kolei służy do polaryzacji bazy tranzystora:

$$R_1 = \frac{V_{cc} - V_B}{20I_B} = 75,75 \text{ (k}\Omega\text{)} \quad R_2 = \frac{V_B}{20I_B} = 14,25 \text{ (k}\Omega\text{)} \quad (13)$$

Następnie możemy obliczyć wartości R_{E1} oraz R_{E2} , które służą do stabilizacji punktu pracy:

$$R_{E1} + R_{E2} = \frac{V_E}{I_E} = \frac{V_E}{I_c} = 0,6 \text{ (k}\Omega\text{)} \quad R_{E1} = -\frac{R_c}{K_u} = 108 \text{ (}\Omega\text{)} \quad R_{E2} = 492 \text{ (}\Omega\text{)} \quad (14)$$

I na końcu obliczymy wartości C_i oraz C_o :

$$C_o = \frac{1}{2\pi R_c f_{g2}} = 327,5 \text{ (pF)} \quad C_i = \frac{1}{2\pi (R_1 || R_2) f_{g1}} = 49 \text{ (nF)} \quad (15)$$

3.3 Budowa i pomiar punktów pracy wzmacniacza w układzie WE

Następnie wykorzystując prototypową płytkę stykową zmontowaliśmy układ. Dobraliśmy komponenty o zbliżonych wartościach do wyliczonych. Wartości wybranych rezystorów oraz kondensatorów różniły się maksymalnie +/-5% względem obliczonych wielkości. Wykorzystaliśmy komponenty o wartościach:

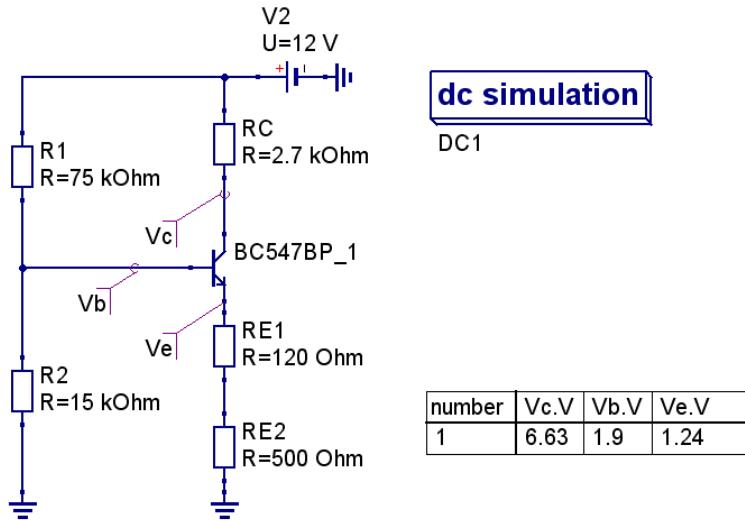
Tabela 3: Wartości wykorzystanych elementów do budowania układu

R_C [k Ω]	R_{E1} [Ω]	R_{E2} [Ω]	R_1 [k Ω]	R_2 [k Ω]	C_o [pF]	C_i [nF]
2,7	120	500	75	15	330	50

Dokonaliśmy pomiaru punktu pracy układu: napięć V_B , V_E , V_C . Otrzymaliśmy wyniki:

$$V_B = 1,95 \text{ (V)} \quad V_E = 1,3165 \text{ (V)} \quad V_C = 6,341 \text{ (V)} \quad (16)$$

Punkt pracy znajdziemy jeszcze za pomocą symulacji:



Rysunek 16: Wyszimulowana charakterystyka wyjściowa tranzystora BC547

Teraz na podstawie zebranych wartości sporządzimy tabelę:

Tabela 4: Porównanie pomiarów napięć z wartościami teoretycznymi

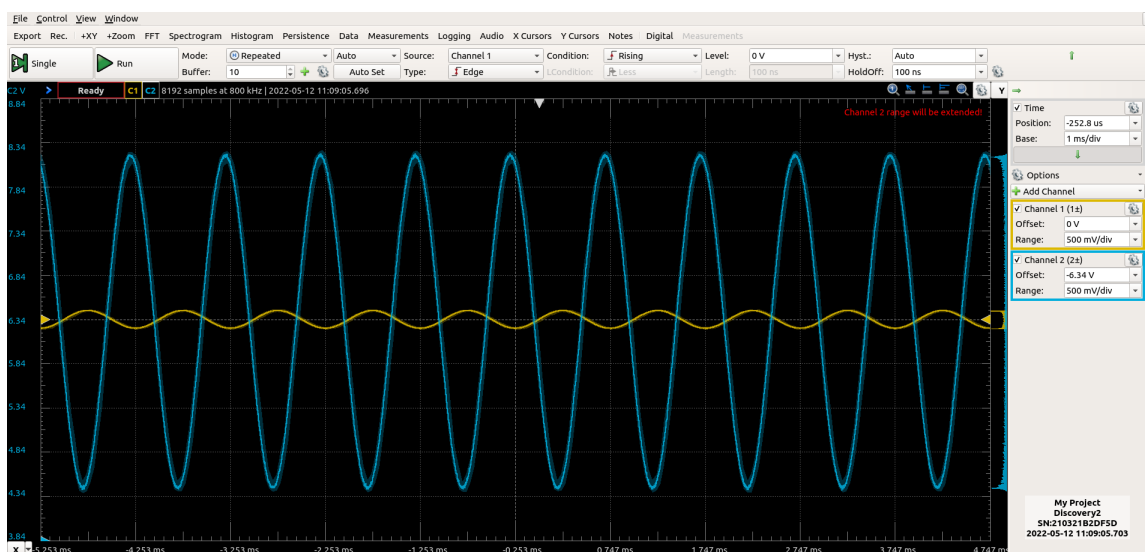
Wartość	Vc [V]	Vb [V]	Ve [V]
Podana w ćwiczeniu	6,60	1,90	1,20
Symulacja	6,63	1,90	1,24
Zmierzona	6,34	1,95	1,32
ΔV (Ćwiczenie, Zmierzone) [%]	3,94	2,63	9,71
ΔV (Symulacja, Zmierzone) [%]	4,37	2,63	6,17

Analizując powyższe wyniki można wywnioskować, że układ pracuje w stanie normalnym, a różnicy w otrzymanych wartościach są stosunkowo niewielkie i mogą być spowodowane stosowaniem rzeczywistych elementów lub parametrami tranzystora zastosowanego w symulacji.

3.4 Charakterystyka częstotliwościowa wzmacniacza w układzie WE

3.4.1 Wyznaczenie offsetu sygnału wyjściowego

Ze względu na ograniczoną ilość czasu na laboratorium zrobiliśmy tylko wyznaczenie offsetu sygnału wyjściowego, co jest przedstawione na poniższym rysunku:

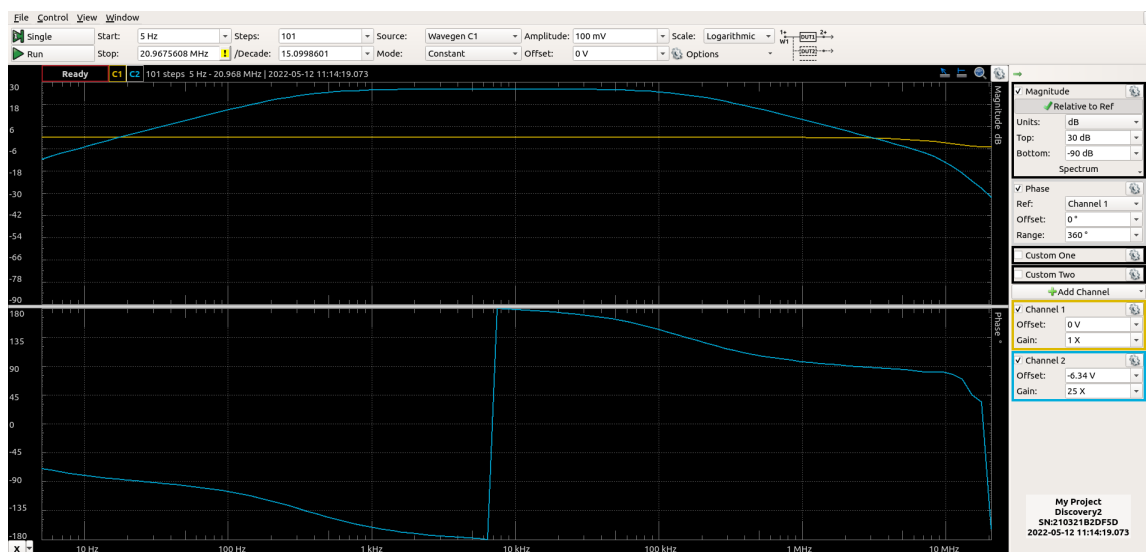


Rysunek 17: Wyznaczenie offsetu sygnału wyjściowego

Z rysunku widzimy, że bezwzględna wartość offsetu wynosi 6,34 V, co jest bardzo zbliżone do napięcia na kolektorze tranzystora wyznaczonego w punkcie 3. Różnica jest rzędu 0,016%.

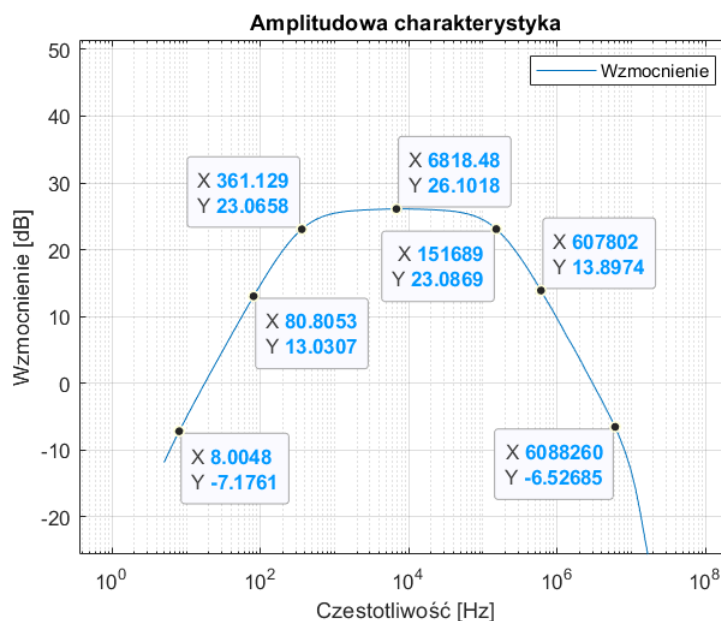
3.4.2 Charakterystyka częstotliwościowa wzmacniacza

W tym podpunkcie w celu wyznaczenia funkcji przenoszenia układu wykorzystaliśmy analizator sieci dostępny w aplikacji WaveForms z następującymi parametrami: zakres 10Hz – 5MHz, amplituda 100mV, ilość kroków 101. Otrzymaliśmy następujące charakterystyki: amplitudową oraz fazową:



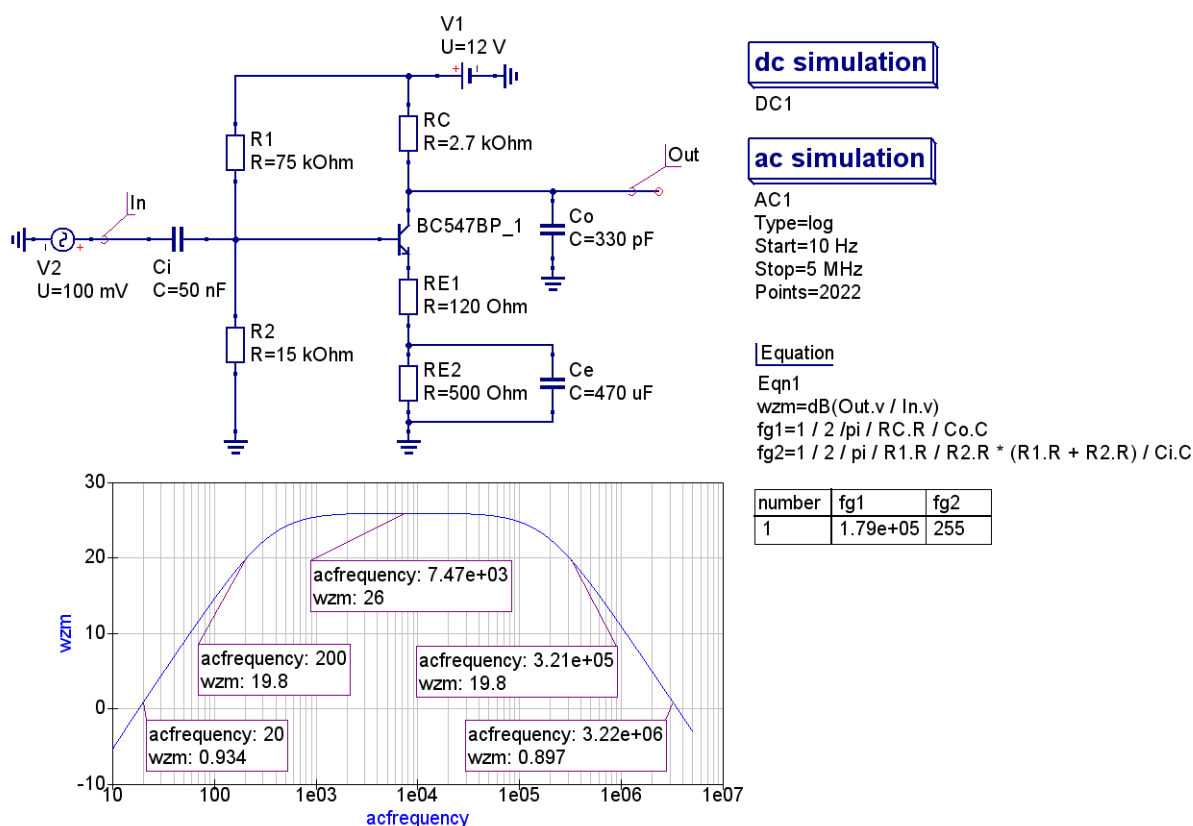
Rysunek 18: Amplitudowa charakterystyka częstotliwościowa

Na podstawie zapisanych danych jesteśmy w stanie wyznaczyć najważniejsze wielkości, które by charakteryzowały powyższy wzmacniacz (wzmocnienie w paśmie przenoszenia, częstotliwości graniczne i nachylenia asymptotyczne). Poniżej jest przedstawiony wynik w postaci wykresu:



Rysunek 19: Określenie najważniejszych wielkości opisujących wzmacniacz

Dodatkowo dokonaliśmy symulacji powyżej opisanego układu:



Rysunek 20: Wyszimulowana charakterystyka amplitudowa

Dla uproszczenia analizy zbierzemy otrzymane wartości w tabelę:

Wartość	K_u [V/V]	f_{g1} [kHz]	f_{g2} [kHz]	/ [dB / dec]	\ [dB / dec]
Podana w ćwiczeniu	-25,00	270,00	180,00	-	-
Symulacja	-26,00	179,00	0,26	18,87	-18,90
Zmierzona	-26,10	151,70	0,36	20,21	-20,42
Δ (Ćwiczenie, Zmierzone) [%]	4,40	43,81	99,80	-	-
Δ (Symulacja, Zmierzone) [%]	0,38	15,25	38,46	7,10	8,04

Widzimy, że oprócz częstotliwości granicznych wszystkie wartości są zbliżone do teoretycznych. Taka różnica w otrzymanych częstotliwościach może być spowodowana zbyt dużą czułością układu do zmiany wartości rezystancji oraz pojemności. Natomiast zbliżoność symulacji do zebranych wyników potwierdza, że ćwiczenie zostało wykonane poprawnie.