

SYSTEMY ANALOGOWE I CYFROWE

Wzmacniacz tranzystorowy

Prowadzący: dr inż. Adam Wąż

Autor: Emilia Szymańska

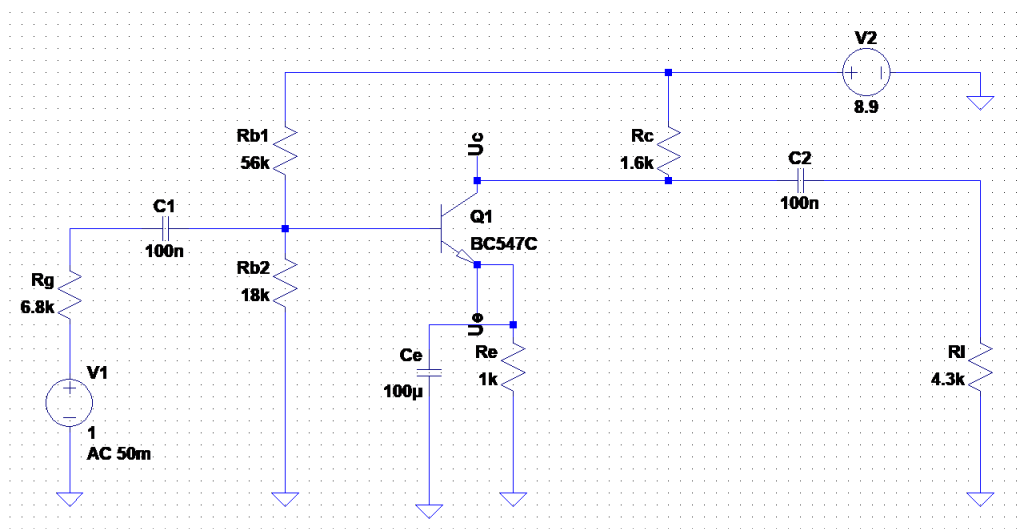
22.06.2020r.

1 Wstęp

Celem ćwiczenia jest zaprojektowanie i zapoznanie się właściwościami jednostopniowego, tranzystorowego wzmacniacza napięcia, w tym ocena dokładności stosowanej metody projektowania wzmacniacza.

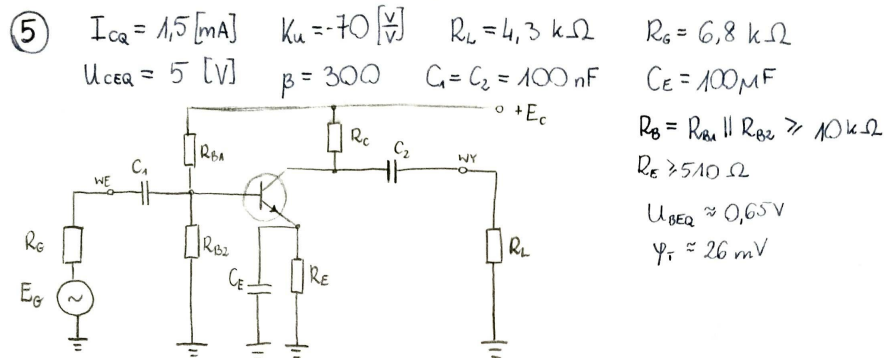
2 Zaprojektowany układ

$U_{CEQ} = 5V$, $I_{CQ} = 1.5mA$, $K_u = -70 \frac{V}{V}$, $\beta = 300$, $U_{BEQ} \approx 0.65V$, $\varphi_T \approx 26mV$, $C_E = 100\mu F$, $C_1 = C_2 = 100nF$, $R_L = 4.3k\Omega$, $R_G = 6.8k\Omega$, $R_C = 1.6k\Omega$, $R_E = 1k\Omega$, $R_{B1} = 56k\Omega$, $R_{B2} = 18k\Omega$, $E_C = 8.9V$



Rysunek 1: Wzmacniacz tranzystorowy - układ

3 Obliczenia projektowe



$$K_u = -g_m \cdot (R_L \parallel r_{uy}) \quad g_m = \frac{I_{CQ}}{\varphi_T} \quad \varphi_T \approx 26 \text{ mV} \quad r_{uy} \approx R_C$$

$$K_u = -\frac{I_{CQ}}{\varphi_T} \cdot \frac{R_L R_C}{R_L + R_C} \quad -K_u \cdot \frac{\varphi_T}{I_{CQ}} = \frac{R_L R_C}{R_L + R_C} \quad R_L \cdot (-K_u \frac{\varphi_T}{I_{CQ}}) = R_C (R_L + K_u \frac{\varphi_T}{I_{CQ}})$$

$$R_C = \frac{-R_L K_u \frac{\varphi_T}{I_{CQ}}}{R_L + K_u \frac{\varphi_T}{I_{CQ}}} \quad R_C = \frac{-4300 \cdot (-70) \cdot \frac{26 \cdot 10^{-3}}{1,5 \cdot 10^{-3}}}{4300 + 70 \cdot \frac{26 \cdot 10^{-3}}{1,5 \cdot 10^{-3}}} \approx 1690 \Omega \approx 1,6 \text{ k}\Omega$$

$$R_E = 1 \text{ k}\Omega$$

$$U_{CEQ} = E_C - I_{CQ} (R_E + R_C) \quad E_C = U_{CEQ} + I_{CQ} (R_E + R_C)$$

$$E_C = 5 + 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 1,6) \cdot 10^3 = 5 + 3,9 = 8,9 \text{ [V]}$$

$$U_B = E_C \cdot \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \quad R_B = R_{B1} \parallel R_{B2}$$

$$I_{CQ} = \beta \cdot \frac{U_B - U_{BEQ}}{R_B + (\beta + 1) R_E} = \beta \cdot \frac{E_C \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} - U_{BEQ}}{R_B + (\beta + 1) R_E}$$

$$I_{CQ} R_B + (\beta + 1) I_{CQ} R_E = \beta E_C \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} - \beta U_{BEQ}$$

$$(\beta + 1) I_{CQ} R_E + \beta U_{BEQ} = -I_{CQ} \frac{R_{B1} R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} + \beta E_C \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

$$\underbrace{(\beta + 1) I_{CQ} R_E + \beta U_{BEQ}}_{301 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3 + 300 \cdot 0,65 = 646,5} = \frac{R_{B2} (-I_{CQ} R_{B1} + \beta E_C)}{R_{B1} + R_{B2}}$$

$$646,5 R_{B1} + 646,5 R_{B2} = -1,5 \cdot 10^{-3} \cdot R_{B1} R_{B2} + 2670 R_{B2}$$

$$646,5 R_{B1} = -1,5 \cdot 10^{-3} R_{B1} R_{B2} + 2023,5 R_{B2}$$

$$R_{B2} = \frac{646,5 R_{B1}}{-1,5 \cdot 10^{-3} R_{B1} + 2023,5}$$

$$R_{B1} = 56 \text{ k}\Omega$$

$$R_{B2} = \frac{646,5 \cdot 56 \cdot 10^3}{2023,5 - 56 \cdot 10^3 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}} \approx 18 \text{ k}\Omega$$

Rysunek 2: Obliczenia

Dodatkowo korzystając z poniższych wzorów, obliczam pozostałe parametry za pomocą arkusza w Excelu, który korzysta z następujących wzorów:

$$r_{be} = \frac{\beta}{g_m} = \frac{\varphi_T \cdot \beta}{I_{CQ}} \approx 5.2k\Omega$$

$$R_B = R_{B1} || R_{B2} \approx 13.622k\Omega$$

$$r_{ce} = \frac{U_Y}{I_{CQ}} \approx 66.667k\Omega$$

$$r_{weCe} = \frac{R_B \cdot r_{be}}{R_B + r_{be}} \approx 3.76k\Omega$$

$$r_{wyCe} = \frac{R_C \cdot r_{ce}}{R_C + r_{ce}} \approx 1.563k\Omega$$

$$r_{webezCe} = \frac{R_B \cdot (r_{be} + R_E(\beta + 1))}{R_B + r_{be} + R_E(\beta + 1)} \approx 13k\Omega$$

$$r_{wybezCe} \approx R_C \approx 1.6k\Omega$$

$$K_{uCe} = -g_m \cdot (R_L || r_{wy})^{-1} \approx -66.2 \frac{V}{V}$$

$$K_{uSKCe} = K_u \cdot \frac{r_{weCe}}{r_{weCe} + R_G} \approx -23.6 \frac{V}{V}$$

$$K_{ubezCe} \approx -\frac{R_C}{R_E} = \frac{1.6}{1} \approx -1.6 \frac{V}{V}$$

$$K_{uSKbezCe} = -K_u \cdot \frac{r_{webezCe}}{r_{webezCe} + R_G} \approx -1.05 \frac{V}{V}$$

$$c_{be} = \frac{I_{CQ}}{2\varphi_T \pi f_T} - c_{bc} \approx 0.29pF$$

$$c_{we} = c_{be} + c_{bc} \cdot (1 + K_u)$$

$$c_{weCe} \approx 14nF$$

$$c_{webezCe} \approx 4.9pF$$

$$f_{d1}(C_1) = \frac{1}{2\pi C_1(R_G + r_{we})}$$

$$f_{d1Ce}(C_1) \approx 151Hz$$

$$f_{d1bezCe}(C_1) \approx 80Hz$$

$$f_{d2}(C_2) = \frac{1}{2\pi C_2(R_L + r_{wy})}$$

$$f_{d2}(C_2) \approx 271Hz$$

$$f_{dE}(C_E) = \frac{\beta}{2\pi C_E(R_G || R_B + r_{be})}$$

$$f_{dE}(C_E) \approx 49Hz$$

$$f_g = \frac{1}{2\pi c_{we}(r_{we} || R_G)}$$

$$f_{gCe} \approx 459kHz$$

$$f_{gbezCe} \approx 7.251MHz$$

$$f_{dCe} = \sqrt{f_{d1}^2 + f_{d2}^2 + f_{dE}^2} \approx 314Hz$$

$$f_{dbezCe} = \sqrt{f_{d1}^2 + f_{d2}^2} \approx 283Hz$$

4 Pomiar

$$R_L = 4.28k\Omega$$

$$R_G = 6.73k\Omega$$

$$R_C = 1.594k\Omega$$

$$R_E = 990\Omega$$

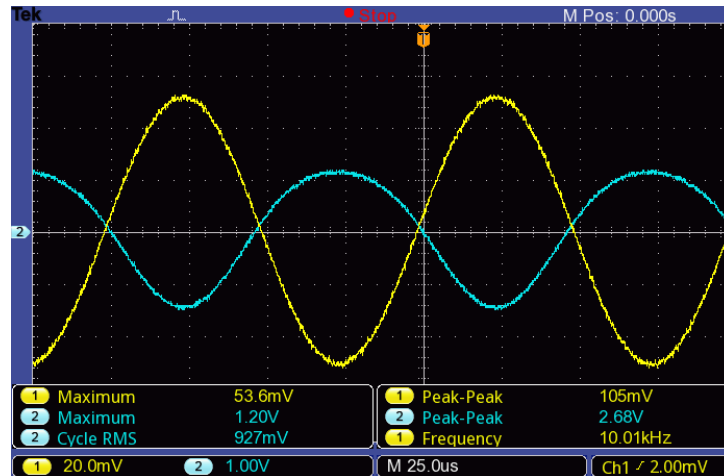
$$R_{B1} = 56.2k\Omega$$

$$R_{B2} = 17.61k\Omega$$

Mierzę punkt pracy tranzystora dla założonego E_C i obliczonych parametrów elementów biernych. Wartości otrzymuję następujące: $U_{CEQ} = 5.1770V$, $U_{RC} = 2.3715V$ i $U_{BEQ} = 0.6344V$. Metodą pośrednią obliczam wartość prądu wpływającego do kolektora $I_{CQ} = \frac{U_{RC}}{R_C} = \frac{2.3715}{1594} \approx 1.4878mA$. Punkt pracy pokrywa się zatem z założonym.

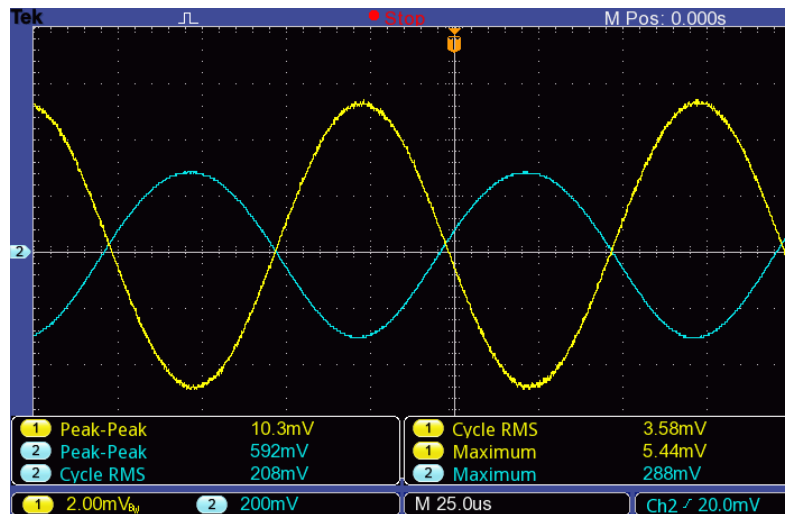
4.1 Pomiar dla wzmacniacza bez sprzężenia zwrotnego

Podłączam wejście układu do generatora, a wyjście do oscyloskopu. Ustawiam częstotliwość pomiarową na 10kHz i amplitudę tak, aby sygnał wyjściowy był nieznkształcony. Regulując amplitudę sygnału wejściowego określłam wartość maksymalnej nieznkształconej amplitudy napięcia na wyjściu układu. Zauważam, że dla amplitudy powyżej ok. 100 mV sygnał na wyjściu staje się znkształcony.



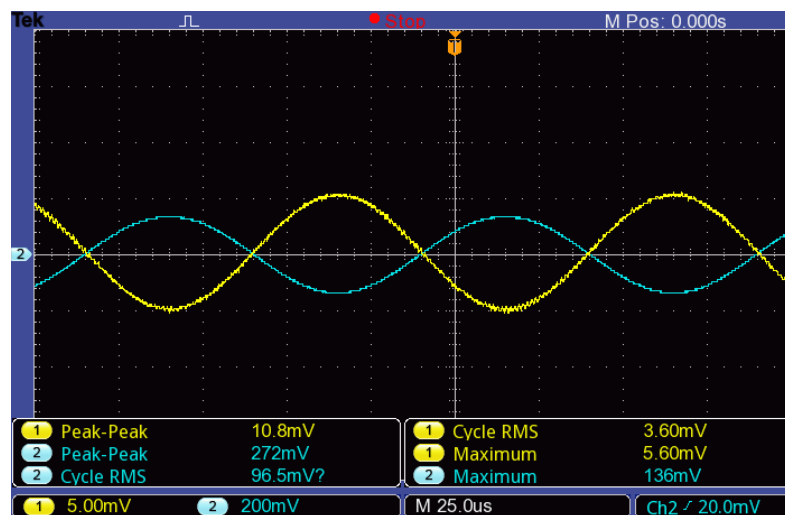
Rysunek 3: Powoli pojawiające się znkształcenia sygnału wyjściowego

Umieszczam zworke na Z_1 i dla amplitudy $A = 10\text{mV}$ (w zakresie nieznkształconego sygnału na wyjściu) obserwuję na oscyloskopie sygnał wejściowy i wyjściowy.



Rysunek 4: Pomiar dla zwartego Z_1

Na podstawie zmierzonych wartości obliczam wzmocnienie $K_u = \frac{U_{wy}}{U_{we}} \approx 57 \frac{\text{V}}{\text{V}} \approx 35\text{dB}$. Następnie rozwieram Z_1 i ponownie obserwuję napięcia.



Rysunek 5: Pomiar dla rozwartego Z_1

Na tej podstawie obliczam wzmocnienie skuteczne $K_{uSK} = \frac{U_{wy}}{U_{weG}} \approx 25 \frac{V}{V} \approx 28dB$. Mając powyższe dane, mogę oszacować rezystancję wejściową wzmacniacza.

$$r_{we} = \frac{R_G}{\frac{K_u}{K_{uSK}} - 1} - r_{wydzielnika} = \frac{6730}{\frac{57}{25} - 1} - 141 \approx 5.117k\Omega$$

W następnym kroku przy rozwartym Z_1 zwieram i rozwieram Z_2 , mierząc napięcie na wyjściu. Otrzymuję $U_{wy1} = 280mV$, $U_{wy2} = 384mV$. Podstawiam wartości do wzoru i obliczam rezystancję wyjściową wzmacniacza:

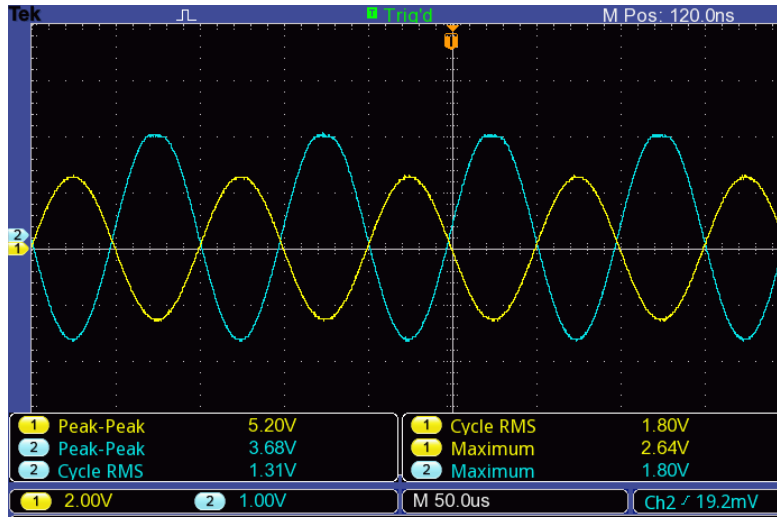
$$r_{wy} = \left(\frac{U_{wy2}}{U_{wy1}} - 1 \right) \cdot R_L = \left(\frac{384}{280} - 1 \right) \cdot 4280 \approx 1.59k\Omega$$

Na koniec, zmieniając częstotliwość generatora, określami częstotliwości graniczne: dolną f_d i górną f_g wzmacniacza - patrząc, gdzie względem wzmocnienia w dB można zaobserwować trzydecybelowy spadek wartości. Otrzymałam wartości $f_d = 260Hz$ oraz $f_g = 340kHz$.

4.2 Pomiary dla wzmacniacza ze sprzężeniem zwrotnym

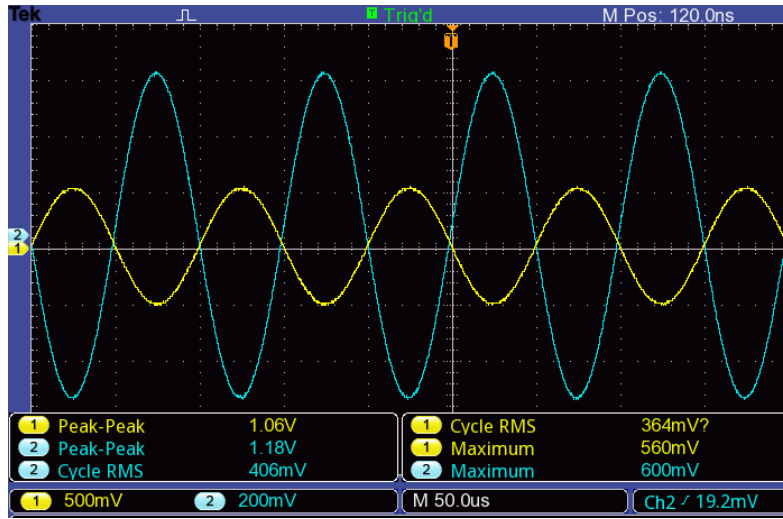
Wylutowuję kondensator C_E .

Podłączam wejście układu do generatora, a wyjście do oscyloskopu. Ustawiam częstotliwość pomiarową na 10kHz i amplitudę tak, aby sygnał wyjściowy był nieznkształcony. Regulując amplitudę sygnału wejściowego określami wartość maksymalnej nieznkształconej amplitudy napięcia na wyjściu układu. Zauważam, że dla amplitudy powyżej ok. 5 V sygnał na wyjściu staje się znkształcony.



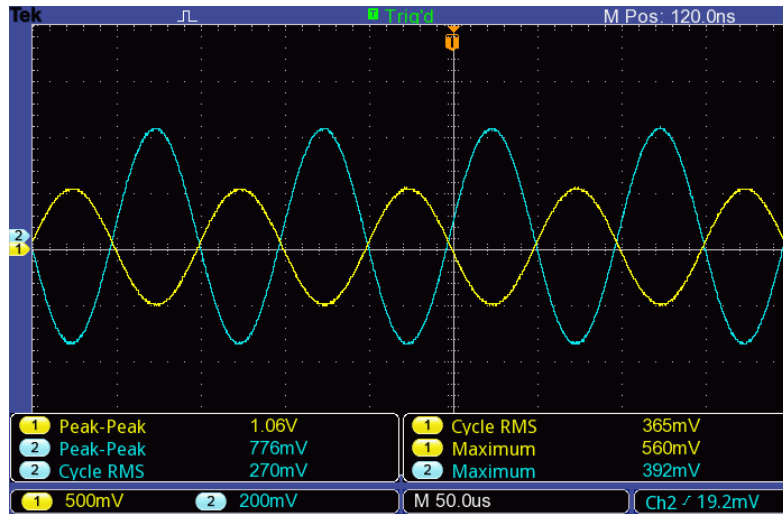
Rysunek 6: Powoli pojawiające się znkształcenia sygnału wyjściowego

Umieszczam zworę na Z_1 i dla amplitudy $A = 1 V$ (w zakresie nieznkształconego sygnału na wyjściu) obserwuję na oscyloskopie sygnał wejściowy i wyjściowy.



Rysunek 7: Pomiar dla zwartego Z_1

Na podstawie zmierzonych wartości obliczam wzmocnienie $K_u = \frac{U_{wy}}{U_{we}} \approx 1.11 \frac{V}{V} \approx 0.91dB$. Następnie rozwieram Z_1 i ponownie obserwuję napięcia.



Rysunek 8: Pomiar dla rozwartego Z_1

Na tej podstawie obliczam wzmocnienie skuteczne $K_{uSK} = \frac{U_{wy}}{U_{weG}} \approx 0.73 \frac{V}{V} \approx -2.73dB$. Mając powyższe dane, mogę oszacować rezystancję wejściową wzmacniacza.

$$r_{we} = \frac{R_G}{\frac{K_u}{K_{uSK}} - 1} - r_{wydzielnika} = \frac{6730}{\frac{1.11}{0.73} - 1} - 141 \approx 12.801k\Omega$$

W następnym kroku przy rozwartym Z_1 zwieram i rozwieram Z_2 , mierząc napięcie na wyjściu. Otrzymuję $U_{wy1} = 776mV$, $U_{wy2} = 1060mV$. Podstawiam wartości do wzoru i obliczam rezystancję wyjściową wzmacniacza:

$$r_{wy} = \left(\frac{U_{wy2}}{U_{wy1}} - 1 \right) \cdot R_L = \left(\frac{1060}{776} - 1 \right) \cdot 4280 \approx 1.566k\Omega$$

Na koniec, zmieniając częstotliwość generatora, określami częstotliwości graniczne: dolną f_d i górną f_g wzmacniacza - patrzę, gdzie względem wzmocnienia w dB można zaobserwować trzydecybelowy spadek wartości. Otrzymałam wartości $f_d = 270Hz$ oraz $f_g = 3.2MHz$.

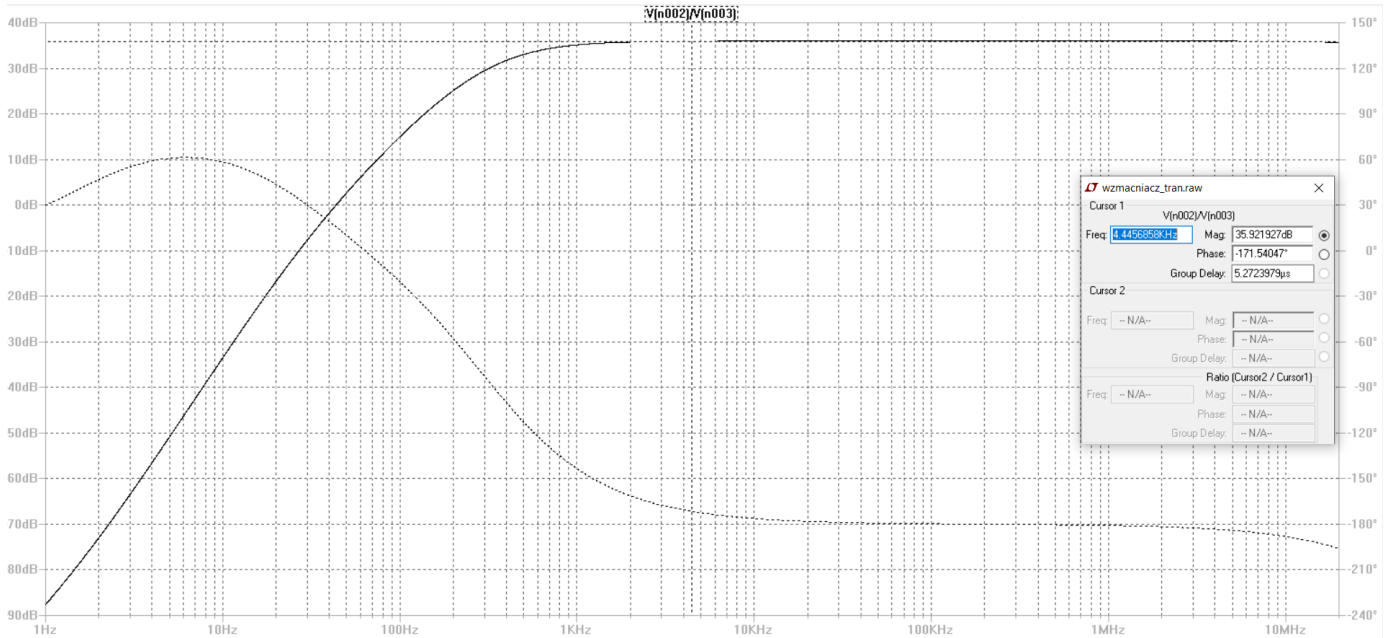
5 Symulacje

Poniżej przedstawiłam kilka symulacji - wyznaczenie wzmocnienia i wzmocnienia skutecznego dla układu z i bez sprzężenia zwrotnego, a także wyznaczenie punktu pracy.

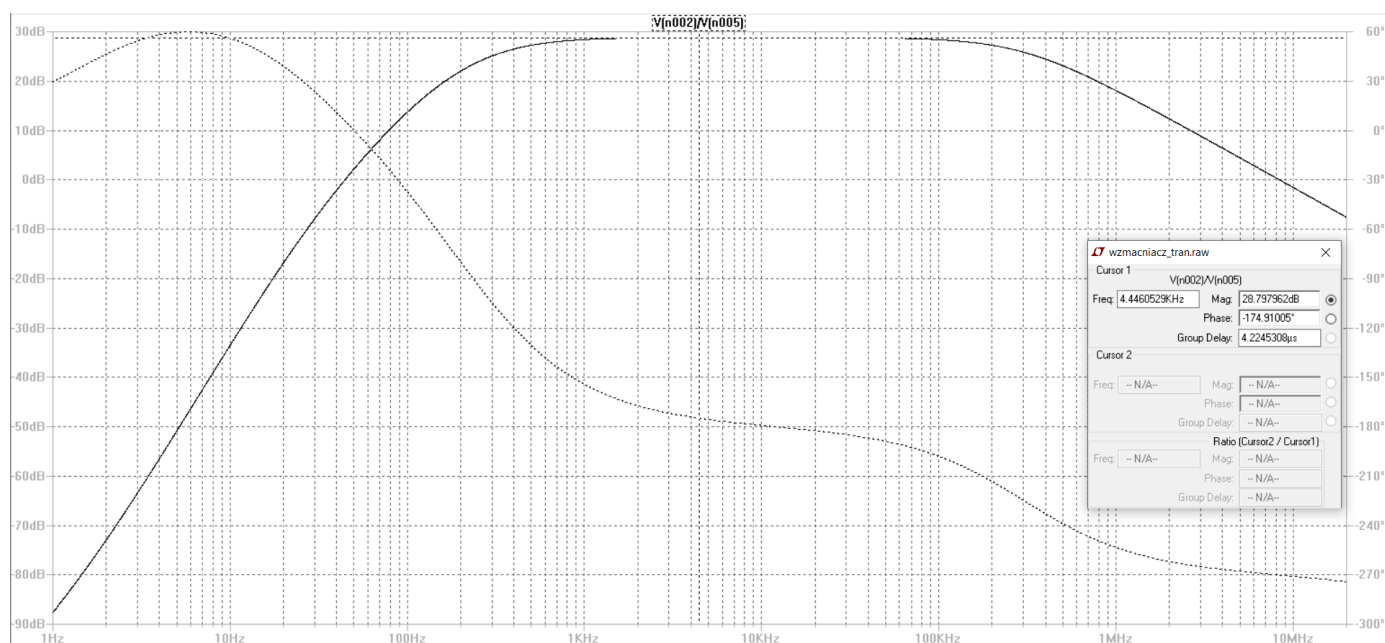
Wyznaczyłam też częstotliwości graniczne za pomocą kursorów na symulacji, szukając trzydecybelowych spadków względem płaskiego przebiegu.

Dla układu bez sprzężenia zwrotnego: $f_d \approx 490Hz$, $f_g \approx 303kHz$.

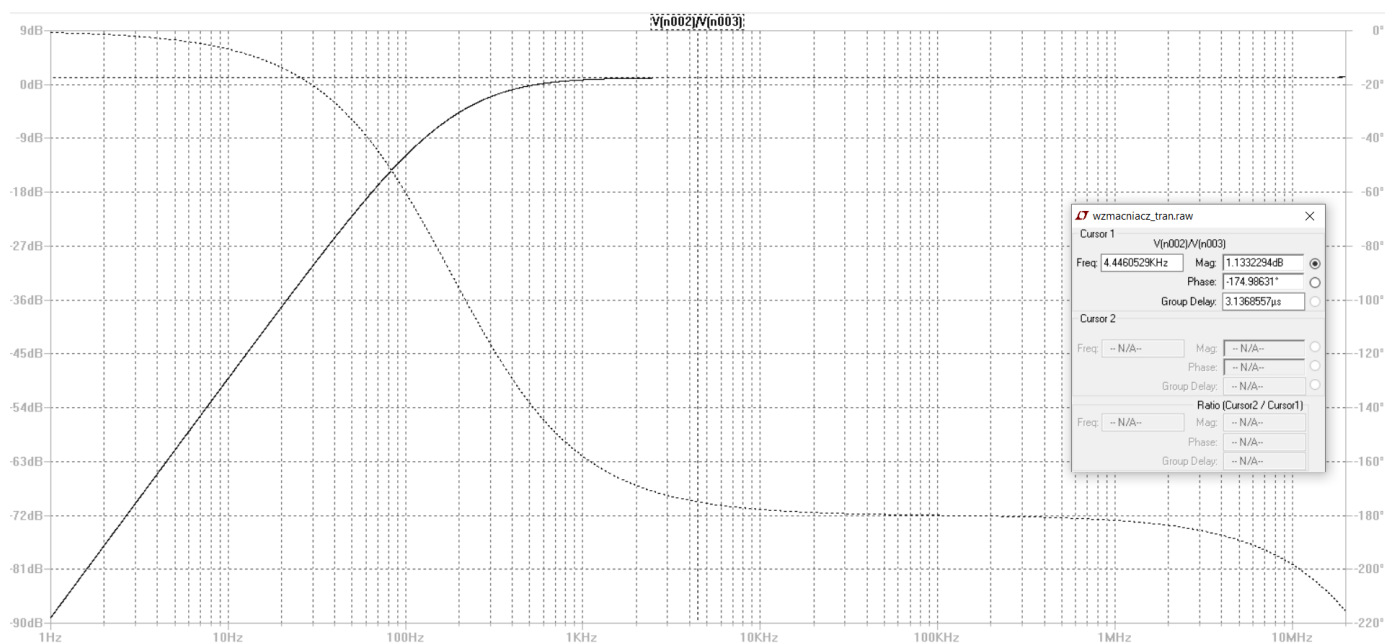
Dla układu ze sprzężeniem zwrotnym: $f_d \approx 290Hz$, $f_g \approx 6.2MHz$.



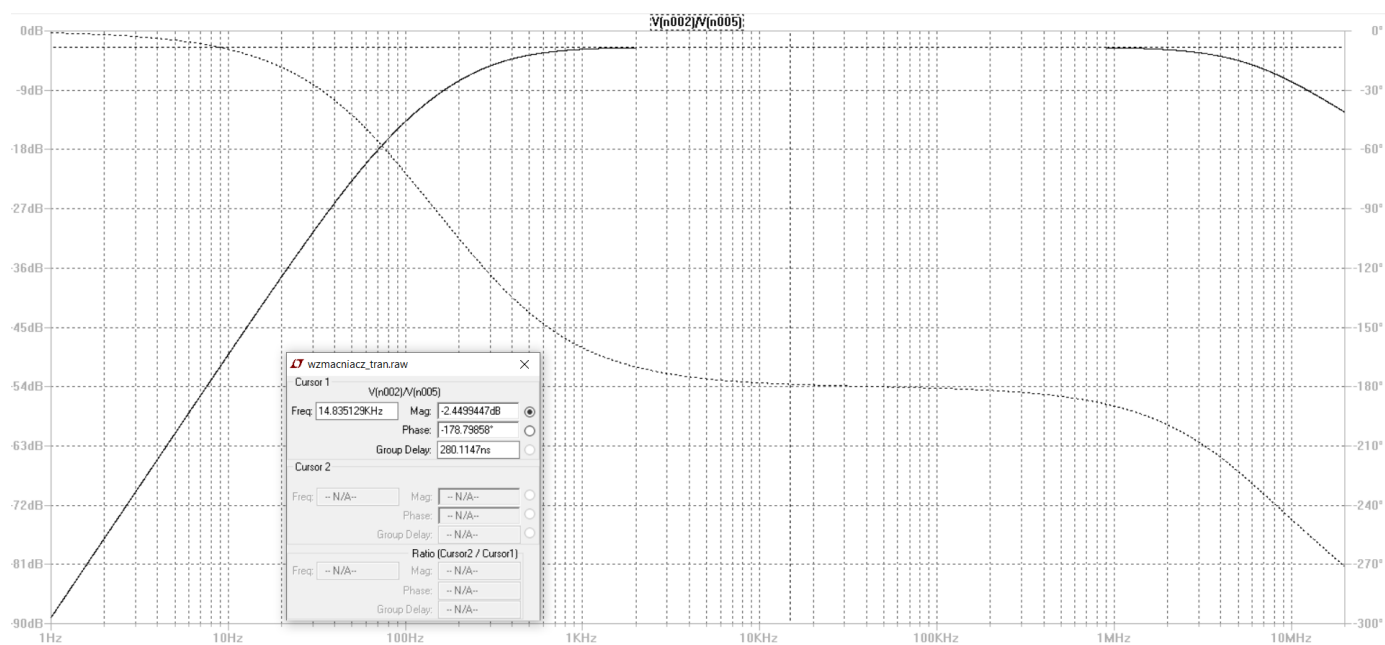
Rysunek 9: Pomiar K_u dla układu z C_E



Rysunek 10: Pomiar K_{uSK} dla układu z C_E



Rysunek 11: Pomiar K_u dla układu bez C_E

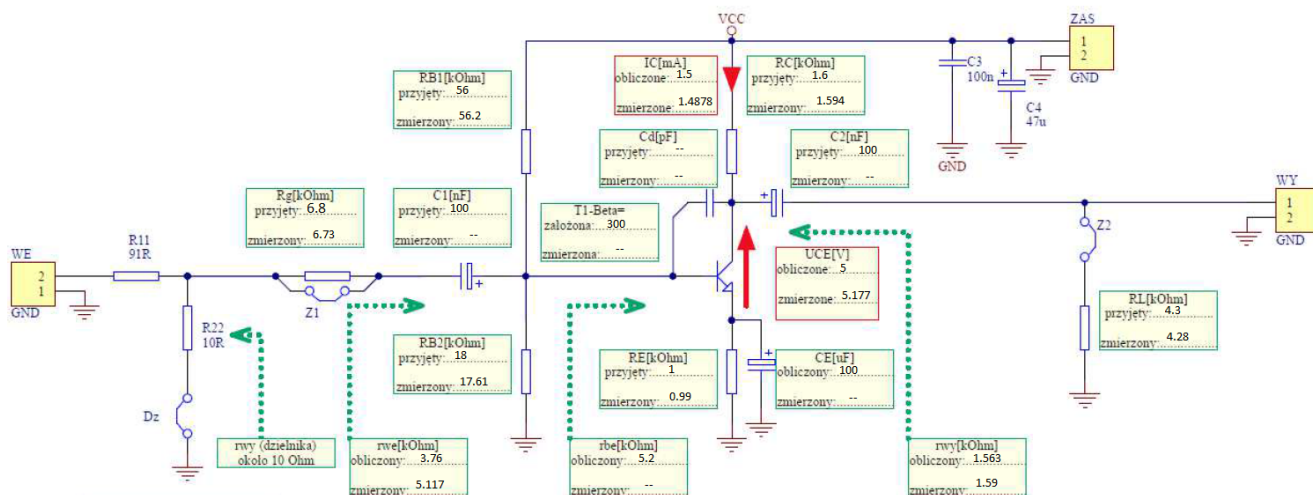


Rysunek 12: Pomiar K_{uSK} dla układu bez C_E

--- Operating Point ---		
V(n005):	1	voltage
V(n003):	1	voltage
V(n004):	2.12337	voltage
V(n001):	8.9	voltage
V(ue):	1.493	voltage
V(uc):	6.51608	voltage
V(n002):	2.80191e-015	voltage
Ic(Q1):	0.00148995	device_current
Ib(Q1):	3.04602e-006	device_current
Ie(Q1):	-0.001493	device_current
I(C3):	-1.493e-016	device_current
I(C2):	6.51608e-019	device_current
I(C1):	-1.12337e-019	device_current
I(R1):	-6.51608e-019	device_current
I(Rc):	-0.00148995	device_current
I(Re):	-0.001493	device_current
I(Rb1):	-0.000121011	device_current
I(Rb2):	-0.000117965	device_current
I(Rg):	-9.79609e-020	device_current
I(V2):	-0.00161096	device_current
I(V1):	1.0842e-019	device_current

Rysunek 13: Wyznaczenie punktu pracy

6 Porównanie obliczonych i uzyskanych wyników



Rysunek 14: Wartości zmierzone i obliczone naniesione na schemat

Parametr	Wzmacniacz bez sprzężenia zwrotnego (z CE)				Wzmacniacz ze sprzężeniem zwrotnym (bez CE)			
	Wartość zadana lub obliczona		Wartość zmierzona		Wartość zadana lub obliczona		Wartość zmierzona	
U_{CEQ} [V]	5		5.1770		5		5.1770	
U_{BEQ} [V]	0.65		0.6344		0.65		0.6344	
I_{CQ} [mA]	1.5		1.4878		1.5		1.4878	
K_{USK} [V/V]; [dB]	-23.6	27.4	-25	28	-1.05	4.1	-0.73	-2.73
K_U [V/V]; [dB]	-66.2	36.4	-57	35	-1.6	0.44	-1.11	0.91
f_d [Hz]	314		260		283		270	
f_g [kHz]	459		340		7251		3200	
r_{wy} [kΩ]	1.563		1.59		1.563		1.566	
r_{we} [kΩ]	3.76		5.117		13.04		12.801	

Rysunek 15: Porównanie obliczonych i otrzymanych wartości dla układ z i bez sprzężenia

7 Wnioski

- Wartości napięć, rezystancji, prądów i częstotliwości otrzymane na podstawie obliczeń i pomiarów w większości są do siebie zbliżone. Wzmocnienia dla wzmacniacza bez sprzężenia są bardzo podobne, stosunkowo większa różnica występuje dla wzmacniacza ze sprzężeniem. Punkt pracy w przybliżeniu pokrywa się z założonym, natomiast dużą rozbieżność między obliczonymi a uzyskanymi wartościami można zaobserwować przy górnych częstotliwościach granicznych. Może to być spowodowane niedokładnymi wartościami rezystancji i pojemności wybranych elementów, niedokładnością samych przyrządów pomiarowych, a także zakłóceniami i niemożliwymi idealnymi warunkami przeprowadzania pomiarów.
- Przy zastosowaniu sprzężenia zwrotnego maleje wartość wzmocnienia, lecz zwiększa się wartość górnej częstotliwości granicznej - układ pracuje ze stałym wzmocnieniem w większym zakresie częstotliwości. Ponadto przy sprzężeniu rezystancja wejściowa jest większa niż w przypadku bez sprzężenia.
- Przy wylutowanym kondensatorze C_E możemy podać na wejście sygnał o większej amplitudzie, nie uzyskując przy tym zniekształceń. Sprzężenie zwrotne zapewnia zatem większą stabilność układu.