



Politechnika Wrocławska

Systemy Analagowe i Cyfrowe

LAB nr 7

Wzmacniacze tranzystorowe

Autorzy:	Aleksander Łyskawa 275462 Kacper Karkosz 275495
Wydział i kierunek studiów:	W12N, Automatyka i Robotyka
Termin zajęć:	pon 13:15-15:30
Prowadzący:	dr inż. Marek Kukawczyński
Data:	11.05.2024

1 Temat ćwiczenia

Zadaniem do wykonania było zaprojektowanie wzmacniacza tranzystorowego o zadanych parametrach:

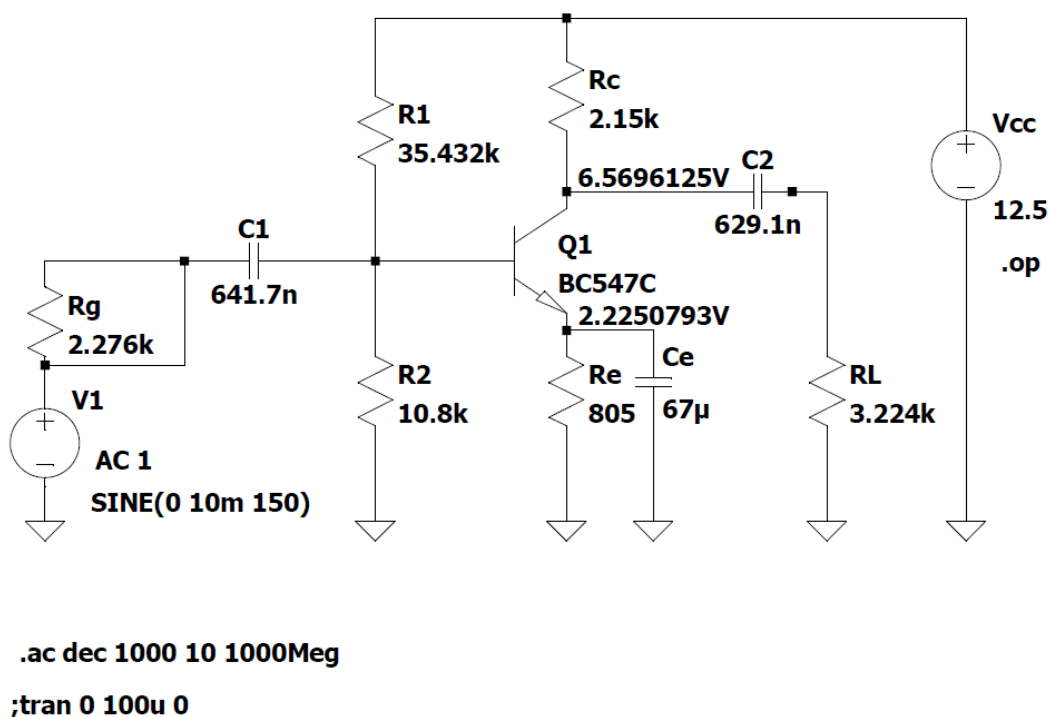
- wzmocnieniu układu $K_u = 120 \left[\frac{V}{V} \right]$
- rezystancji modelującej impedancję źródła $R_g = 2,7 [k\Omega]$
- rezystancji obciążenia $R_L = 3,3 [k\Omega]$

Następnie na zmontowanym układzie przeprowadzono pomiary w celu wyznaczenia:

- punktu pracy tranzystora
- częstotliwości granicznych układu
- charakterystyki wzmocnienia układu
- rezystancji wyjściowej i wejściowej układu
- charakterystyki wzmocnienia układu $K_u = f(U_{cc})$
- charakterystyki wzmocnienia układu $K_u = f(U_{we})$
- charakterystyki przejściowej $U_{wy} = f(U_{we})$

1.1 Projekt w LTSpice

Na Rysunku 1 przedstawiono schemat układu, zaprojektowany w programie LTSpice.



Rys. 1: Schemat układu w programie LTSpice

2 Dobór elementów RC

2.1 Obliczenia

1. Założone zostają parametry punktu pracy tranzystora w układzie:

$$\begin{aligned}I_{CQ} &= 2.5\text{mA}, \\U_{CEQ} &= 5\text{V}\end{aligned}$$

Wartość wzmocnienia prądowego użytego tranzystora: $\beta \approx 100$.

2. Wyznaczone zostają wartości parametrów małosygnałowych tranzystora T1 - r_{ce} oraz g_m :

$$\begin{aligned}r_{ce} &= \frac{U_Y}{I_{CQ}} = \frac{100\text{V}}{2.5\text{mA}} = 40\text{k}\Omega, \\g_m &= \frac{I_{CQ}}{\Theta_T} = \frac{2.5\text{mA}}{26\text{mV}} \approx 96.15\text{mS},\end{aligned}$$

gdzie:

- U_Y - napięcie Early'ego równe 100V dla tranzystorów NPN,
 - Θ_T - potencjał termiczny złącza półprzewodnikowego, równy 26mV
3. Zostaje obliczona wartość rezystora R_3 ze względu na parametry tranzystora oraz założoną wartość wzmocnienia:

$$R_C = \left(\frac{g_m}{KU} - \frac{1}{r_{ce}} - \frac{1}{R_L} \right)^{-1} = \left(\frac{96.15\text{mS}}{120\frac{\text{V}}{\text{V}}} - 0.025\text{mS} - 0.303\text{mS} \right)^{-1} \approx 2,2\text{k}\Omega$$

4. Założona zostaje wartość napięcia na rezystorze R_E , będąca wielokrotnością bariery potencjału U_{BE} tranzystora:

$$U_{RE} \approx 3U_{BE} = 3 \cdot 0.65\text{V} = 1.95\text{V} \approx 2\text{V}$$

5. Obliczone zostaje napięcie zasilania układu U_{cc} :

$$U_{cc} = I_{CQ} \cdot R_C + U_{CEQ} + U_{RE} = 5\text{V} + 2\text{V} + 5,5 = 12.5\text{V}$$

6. Obliczona zostaje wartość rezystora R_E :

$$R_E = \frac{U_{RE}}{I_{CQ}} = \frac{2\text{V}}{2.5\text{mA}} = 800\Omega \approx 820\Omega$$

7. Obliczony zostaje prąd bazy tranzystora T1:

$$I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} = \frac{2.5\text{mA}}{100} = 25\mu\text{A}$$

8. Założony zostaje prąd płynący przez rezystor R_2 , będący wielokrotnością obliczonego prądu bazy tranzystora T1:

$$I_{R2} = 10I_{BQ} = 10 \times 25\mu\text{A} = 250\mu\text{A}$$

9. Za pomocą pierwszego prawa Kirchhoffa obliczony zostaje prąd płynący przez rezystor R_1 :

$$I_{R1} = I_{BQ} + I_{R2} = I_{BQ} + 10I_{BQ} = 11I_{BQ} = 11 \times 25\mu\text{A} = 275\mu\text{A}$$

10. Obliczone zostają wartości rezystorów R_2 i R_1 :

$$R_2 = \frac{U_{R2}}{I_{R2}} = \frac{U_{BEQ} + U_{R4}}{I_{R2}} = \frac{0.65V + 2V}{250\mu A} = \frac{2.65V}{250} \mu A \approx 11k\Omega,$$

$$R_1 = \frac{U_{R1}}{I_{R1}} = \frac{U_{cc} - U_{R2}}{I_{R1}} = \frac{12,5V - 2.65V}{275\mu A} \approx 35k\Omega$$

11. Założono wartości kondensatorów:

$$C_1 = 2,2\mu F,$$

$$C_2 = 4,7\mu F,$$

$$C_E = 100\mu F$$

2.2 Rzeczywiste wartości elementów RC

Rzeczywiste wartości elementów RC zostały zmierzone przy użyciu multimetru, i wynosiły odpowiednio:

- $R_1 = 35,432 [k\Omega]$
- $R_2 = 10,8 [k\Omega]$
- $R_C = 2,15 [k\Omega]$
- $R_E = 805 [\Omega]$
- $R_L = 3,224 [k\Omega]$
- $R_g = 3,264 [k\Omega]$
- $C_1 = 641,7 [nF]$
- $C_2 = 629,1 [nF]$
- $C_E = 67F [\mu F]$

3 Pomiar punktu pracy

3.1 Punkt pracy wyznaczony w symulacji

Korzystając z symulacji w LTSpice, zmierzaliśmy:

- napięcie kolektora $U_{C_{spice}} = 6,6V$
- napięcie emitera $U_{E_{spice}} = 2,23V$

oraz obliczyliśmy napięcie kolektor-emiter:

$$U_{CE_{spice}} = U_C - U_E = 6,6 - 2,23 = 4,37V$$

Następnie obliczyliśmy prąd kolektora:

$$I_{C_{spice}} = \frac{U_{C_{spice}}}{R_C} = \frac{2,23}{805} = 2,77 [mA]$$

i wyznaczyliśmy punkt pracy:

$$Q_{spice} = (U_{CE_{spice}}, I_{C_{spice}}) = (4.37V, 2.77mA) \quad (1)$$

3.2 Punkt pracy wyznaczony na fizycznym układzie

Następnie zmierzaliśmy wartości U_{CE} oraz U_E na fizycznym układzie przy pomocy multimetru i uzyskaliśmy:

- $U_E = 2,15V$
- $U_{CE} = 4,33V$

obliczyliśmy wartość prądu emitera:

$$I_E = \frac{U_E}{R_E} = \frac{2,15}{805} = 2,67 [mA]$$

która okazała się zbliżona do wartości uzyskanej w symulacji, więc nie zastosowaliśmy korekty napięcia wejściowego.

Wyznaczyliśmy punkt pracy tranzystora:

$$Q = (U_{CE}, I_E) = (4.33V, 2.67mA) \quad (2)$$

4 Badanie częstotliwości granicznych układu

4.1 Wzmocnienie maksymalne

Na wejście układu podano sygnał sinusoidalny o częstotliwości $f = 5kHz$. Nastawę amplitudy generatora ustawiono na $0.1V_{peak-to-peak}$. Zmierzaliśmy wartość napięcia na wejściu oraz wyjściu układu, i uzyskaliśmy:

- $U_{we} = 70,4mV$
- $U_{wy} = 768mV$

Obliczyliśmy wzmocnienie układu:

$$K_u = \frac{U_{wy} \cdot 10}{U_{we}} = \frac{768 \cdot 10}{70,4} = 109,09 \frac{V}{V}$$

Standardowe wzmocnienie pomnożyliśmy przez 10, ze względu na dzielnik napięciowy znajdujący się na wejściu układu. Obliczyliśmy spadek wzmocnienia o $3dB$:

$$K_{u3dB} = 0,707 \cdot K_u = 77,13 \frac{V}{V}$$

Następnie, manipulując wartością częstotliwości na generatorze, wyznaczyliśmy częstotliwości graniczne, w których układ osiąga spadek wzmocnienia o $3dB$. Wyniki tych pomiarów przedstawia Tabela 2.

Tab. 2: Pomiary częstotliwości granicznych układu

ze zworą Z1				
Częstotliwość	$U_{we} [mV]$	$U_{wy} [mV]$	$K_u [V/V]$	$K_{u3dB} [V/V]$
$f = 5kHz$	70,4	768	109,09	77,13
$f = fd = 260Hz$	69,2	532	76,88	
$f = fg = 710 kHz$	70,8	546	77,12	

4.2 Wzmocnienie skuteczne

Następnie przystąpiliśmy do wyznaczania częstotliwości granicznych dla wzmocnienia skutecznego. Z układu usunęliśmy zworę Z1, i wykonaliśmy analogiczne kroki jak w punkcie 4.1. Wyniki pomiarów przedstawia Tabela 3.

Tab. 3: Pomiary częstotliwości granicznych układu bez zwory Z1

bez zwory Z1				
Częstotliwość	U_{we} [mV]	U_{wy} [mV]	K_{usk} [V/V]	K_{usk3dB} [V/V]
$f = 5\text{kHz}$	70,4	448	63,64	44,99
$f = f_d = 180\text{Hz}$	70,1	315	44,94	
$f = f_g = 230\text{ kHz}$	70,9	318	44,85	

5 Wyznaczenie rezystancji wejściowej i wyjściowej układu

5.1 Wyznaczenie rezystancji wejściowej r_{we}

Rezystancję wejściową wyznaczono poprzez pomiar napięcia na wejściu i wyjściu układu, manipulując zworą Z1. Wyniki pomiarów przedstawia Tabela 4.

Tab. 4: Pomiary rezystancji wejściowej

bez zwory Z1			ze zworą Z1		
U_{we} [mV]	U_{wy} [mV]	K_{usk} [V/V]	U_{we} [mV]	U_{wy} [mV]	K_U [V/V]
70,4	448	63,64	70,4	768	109,09

Obliczam r_{we} :

$$r_{we} = \frac{R_g}{\frac{K_U}{K_{USK}} - 1} - r_{wydzielnika} = \frac{2,276}{\frac{109.09}{63.64} - 1} - 10 = 3,15 [k\Omega]$$

5.2 Wyznaczenie rezystancji wyjściowej r_{wy}

Rezystancję wyjściową wyznaczono poprzez pomiar napięcia na wejściu i wyjściu układu, manipulując zworą Z3. Wyniki pomiarów przedstawia Tabela 5.

Tab. 5: Pomiary rezystancji wyjściowej

bez zwory Z3		ze zworą Z3	
U_{we} [mV]	U_{wy} [mV]	U_{we} [mV]	U_{wy} [mV]
30,4	3280	70,4	800

Obliczam r_{wy} :

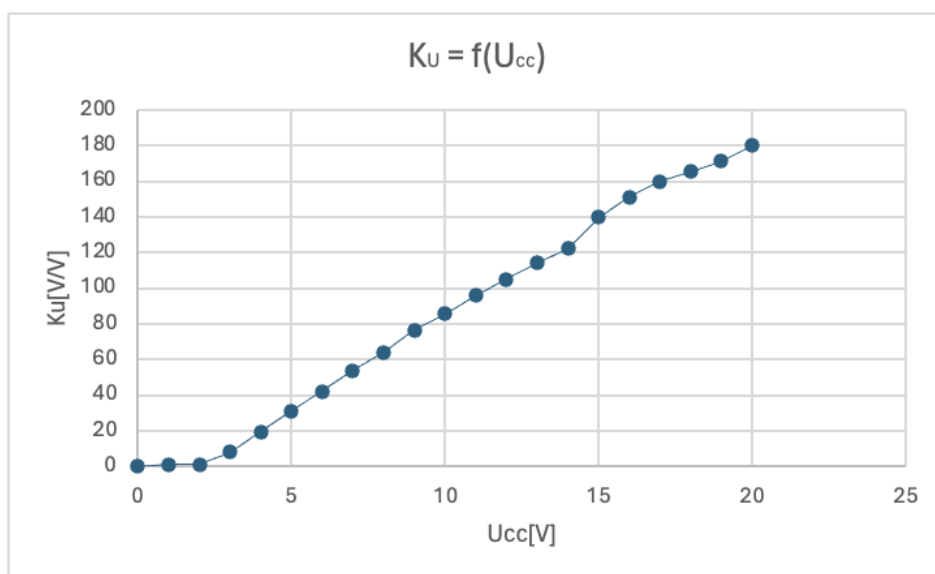
$$r_{wy} = R \cdot \left(\frac{U_{wyze\ zworą}}{U_{wybez\ zwory}} - 1 \right) = \left(\frac{3280}{800} - 1 \right) \cdot 3.224 = 9.9944 [k\Omega]$$

6 Wyznaczenie charakterystyki wzmacnienia $K_u = f(U_{cc})$

Następnie przystąpiliśmy do wyznaczania charakterystyki wzmacnienia układu. W tym celu mierziliśmy napięcia na wejściu i wyjściu układu, zmieniając wartość napięcia U_{cc} co 1V na pomiar. Wyniki pomiarów przedstawia Tabela 6. Rysunek 7 przedstawia wykres zależności $K_u = f(U_{cc})$.

Tab. 6: Pomiary do wyznaczenia charakterystyki wzmacnienia układu

U_{cc}	U_{we}	U_{wy}	K_u
[V]	[mV]	[mV]	[V/V]
0	70	0	0,00
1	70	8	1,14
2	70	8	1,14
3	70	58	8,29
4	70	136	19,43
5	70	218	31,14
6	70	296	42,29
7	70	376	53,71
8	70	450	64,29
9	70	536	76,57
10	70	600	85,71
11	70	672	96,00
12	70	736	105,14
13	70	800	114,29
14	70	856	122,29
15	70	980	140,00
16	70	1060	151,43
17	70	1120	160,00
18	70	1160	165,71
19	70	1200	171,43
20	70	1260	180,00



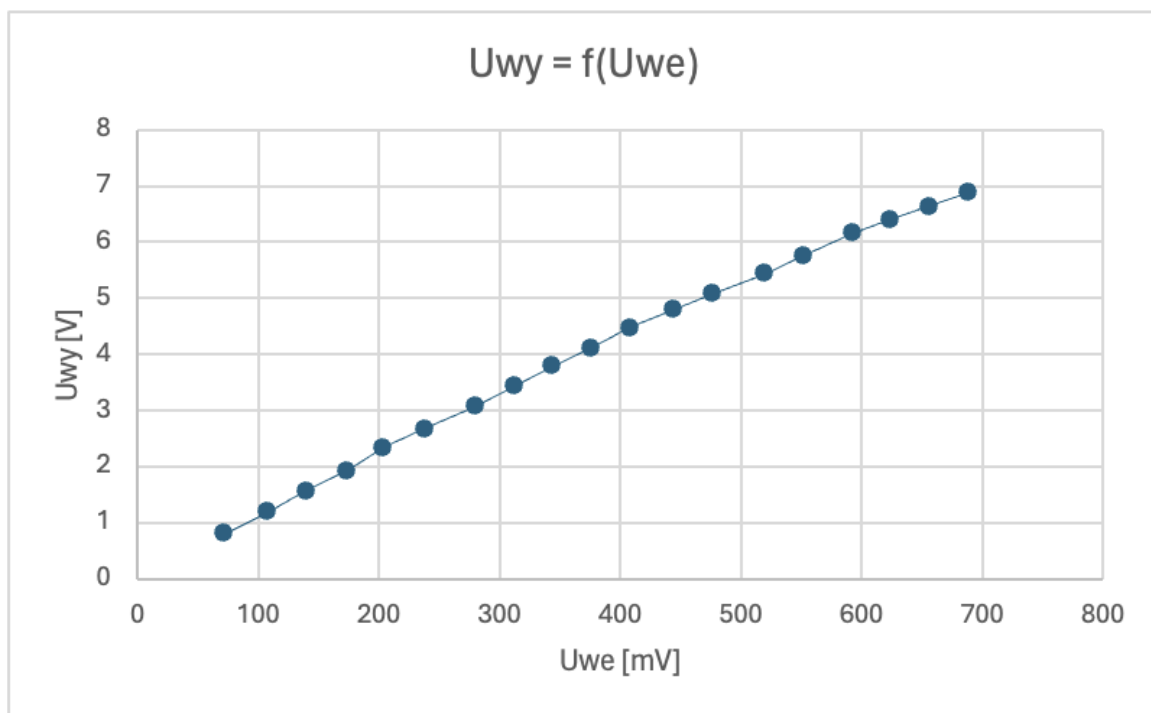
Rys. 7: Charakterystyka wzmacnienia $K_u = f(U_{cc})$

7 Wyznaczenie charakterystyki przejściowej $U_{wy} = f(U_{we})$

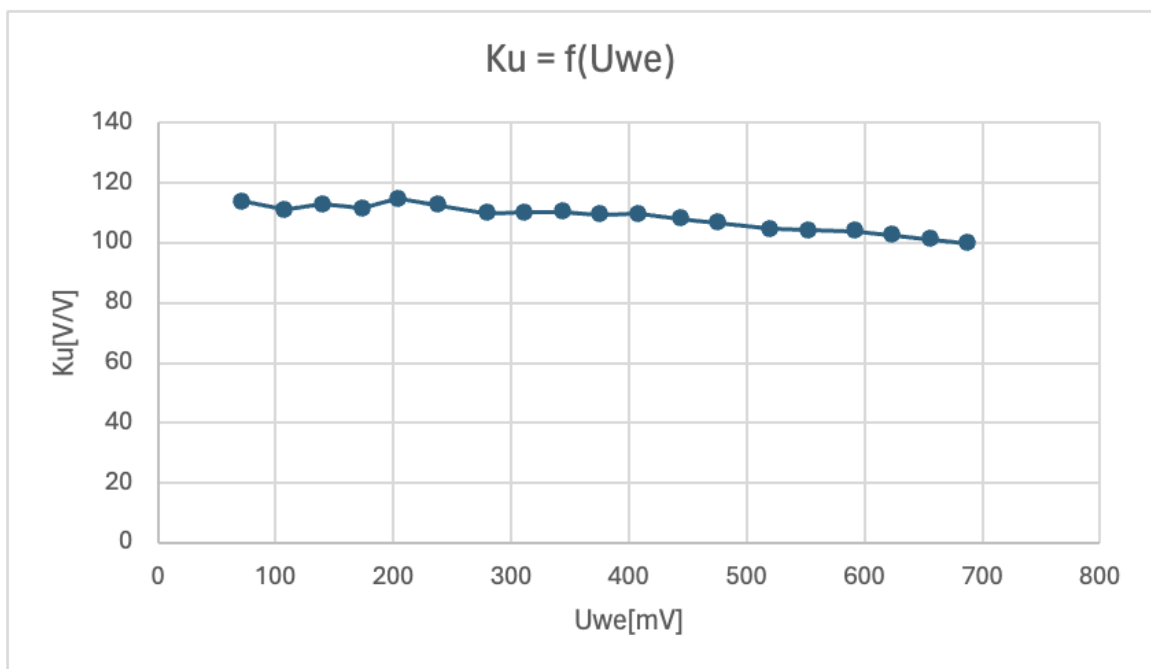
Następnie przystąpiliśmy do wyznaczenia charakterystyki przejściowej. W tym celu mierzyliśmy wartości napięć na wejściu i wyjściu układu przy stałym napięciu $U_{cc} = 12,5V$, manipulując przy tym napięciem na generatorze. Dla każdej ze zmierzonych wartości napięć obliczyliśmy wzmacnienie układu, aby przedstawić tę wielkość jako funkcję napięcia wejściowego. Wyniki pomiarów i obliczenia znajdują się w Tabeli 8. Rysunek 9 i 10 przedstawiają charakterystyki wyrysowane na podstawie Tabeli 8.

Tab. 8: Pomiary i obliczenia do wyznaczenia charakterystyki przejściowej

$U_{\text{generatora}}$	U_{we}	U_{wy}	K_U
mV	[mV]	V	[V/V]
100	72	0,82	113,89
150	108	1,20	111,11
200	140	1,58	112,86
250	174	1,94	111,49
300	204	2,34	114,71
350	238	2,68	112,61
400	280	3,08	110,00
450	312	3,44	110,26
500	344	3,80	110,47
550	376	4,12	109,57
600	408	4,48	109,80
650	444	4,80	108,11
700	476	5,08	106,72
750	520	5,44	104,62
800	552	5,76	104,35
850	592	6,16	104,05
900	624	6,40	102,56
950	656	6,64	101,22
1000	688	6,88	100,00



Rys. 9: Charakterystyka przejściowa układu



Rys. 10: Charakterystyka wzmocnienia $K_u = f(U_{we})$

8 Wnioski

- Punkt pracy wyznaczony za pomocą pomiarów na fizycznym układzie $Q = (4.33V, 2.67mA)$ jest bardzo zbliżony do punktu pracy wyznaczonego symulacyjnie $Q_{spice} = (4.37V, 2.77mA)$, i założonego w obliczeniach $Q_{założone} = (5V, 2.5mA)$. Świadczy to o poprawnym doborze i montażu elementów RC w płytce.
- Zakładane wzmocnienie wynosiło $120\frac{V}{V}$, natomiast osiągnięte w praktyce wzmocnienie to około $113\frac{V}{V}$. Ta niewielka różnica świadczy o precyzyjnym dobraniu oraz obliczeniach elementów, które są zgodne z oczekiwaniami. Można stwierdzić, że wzmocnienie jest zadowalająco bliskie wartości założonej, co potwierdza prawidłowość wykonanego projektu.
- Działanie wzmacniacza tranzystorowego zostało potwierdzone przez zgodność charakterystyk wykreślonych podczas testów z wiedzą teoretyczną. Oznacza to, że wzmacniacz działa zgodnie z przewidywaniami teoretycznymi, co jest kluczowe dla potwierdzenia poprawności projektu. Analiza charakterystyk pozwoliła na potwierdzenie, że układ działa efektywnie i stabilnie.