



Politechnika Wrocławska

Instytut Telekomunikacji i Akustyki

PROJEKT KOMPUTEROWY  
Z UKŁADÓW ELEKTRONICZNYCH  
Semestr zimowy 2006/2007

prowadzący: dr Marek Kukawczyński

TEMAT PROJEKTU:

**Model wzmacniacza operacyjnego.**

WYKONALI: Karol Kozłowski (132652) EIT/ESA  
Krzysztof Głęboki (140550) EIT/EAE

TERMIN ZAJĘĆ: wtorek, 9:00

DATA ODDANIA:

OCENA:

PODPIS:

# Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń.....	4
1. Założenia projektowe.....	5
2. Przegląd literatury i rozwiązań układowych.....	6
2.1. LM101A.....	6
2.2. $\mu$ A741.....	7
2.3. Uproszczony schemat wzmacniacza operacyjnego.....	8
3. Schemat układu.....	9
4. Analiza teoretyczna układu – obliczenia stałoprądowe.....	11
4.1. Stopień różnicowy.....	11
a) wyznaczenie wartości rezystora ustalającego prąd zasilający parę różnicową.....	11
b) prąd wyjściowy stopnia I.....	12
4.2. Stopień wzmacniający i wyjściowy.....	12
a) rezystor .....	12
b) źródło napięciowe.....	13
5. Analiza teoretyczna układu – obliczenia zmiennoprądowe.....	14
5.1. Wzmocnienie I stopnia.....	14
5.2. Wzmocnienie II stopnia.....	14
5.3. Wzmocnienie całkowite.....	15
5.4. Wzmocnienie sumacyjne.....	15
5.5. Współczynnik tłumienia składowej sumacyjnej.....	15
6. Komputerowa symulacja zaprojektowanego układu.....	16
6.1. Symulacja czasowe układu.....	17
6.2. Charakterystyki częstotliwościowe.....	18

7. Komputerowa symulacja układu w postaci końcowej.....	19
7.1. Symulacja w dziedzinie częstotliwości.....	20
a) Charakterystyki częstotliwościowe.....	20
b) Wpływ temperatury na wzmocnienie układu.....	21
c) Wpływ rezystancji generatora na wzmocnienie.....	21
d) Wpływ rezystancji obciążenia na wzmocnienie układu.....	22
7.2. Symulacja w dziedzinie czasu.....	23
a) Napięcie wyjściowe.....	23
b) Reakcja na pobudzenie sygnałem prostokątnym.....	24
c) Charakterystyka przejściowa układu.....	24
d) Wpływ napięcia zasilania.....	25
e) Wejściowe prądy polaryzacji .....	25
f) Pobór mocy.....	26
g) Wpływ wartości napięcia wejściowego na odpowiedź układu.....	27
h) Współczynnik tłumienia składowej sumacyjnej.....	27
7.3. Analiza Monte Carlo i Worst Case.....	28
7.4. Analiza szumów.....	29
8. Wnioski.....	30
9. Dodatki.....	31
9.1. Zastosowane Elementy.....	31
a) Elementy aktywne.....	31
b) Elementy bierne.....	31
c) Specyfikacje zastosowanych elementów.....	31
9.2. Parametry tranzystorów z programu PSpice.....	32
9.3. Wzór obwodu drukowanego.....	33
10. Bibliografia.....	34

## Wykaz ważniejszych oznaczeń:

$\beta_0$	–	wzmocnienie tranzystora
$\Phi_T$	–	stała ...
$CMRR$	–	współczynnik tłumienia składowej sumacyjnej
$f_{gr}$	–	częstotliwość graniczna
$I_{cq}$	–	spoczynkowy prąd kolektora
$I_{bq}$	–	spoczynkowy prąd bazy
$I_{ref}$	–	prąd referencyjny lustra prądowego
$k$	–	stała Boltzmana
$K_{ur}$	–	różnicowe wzmocnienie napięciowe
$K_{us}$	–	sumacyjne wzmocnienie napięciowe
$q$	–	ładunek elementarny
$r_{b'e}$	–	rezystancja obszaru baza – emiter
$r_{ce}$	–	rezystancja obszaru kolektor – emiter
$R$	–	rezystancja elementu obwodu
$R_g$	–	rezystancja wewnętrzna generatora
$R_l$	–	rezystancja obciążenia
$T$	–	temperatura
$V_A$	–	napięcie Early'ego
$V_{be}$	–	napięcie złącza baza – emiter
$V_{cc}$	–	napięcie zasilania obwodu kolektorów
$V_{ceq}$	–	napięcie złącza kolektor – emiter w punkcie pracy tranzystora
$V_{ee}$	–	napięcie zasilania obwodu emiterów
$V_{src}$	–	napięcie źródła
$V_l$	–	napięcie wyjściowe (na obciążeniu)
$V_{out}$	–	napięcie wyjściowe

## 1. Założenia projektowe

Założeniem projektowym jest skonstruowanie wzmacniacza operacyjnego w oparciu o tranzystory bipolarne posiadającego następujące parametry:

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

$$R_g = 50\Omega$$

$$K_{ur} \geq 80\text{ dB} = 10\,000 \frac{V}{V}$$

$$V_{out} = 10\text{ V}$$

Przy projektowaniu zastosowaliśmy tranzystory bipolarne BC847A i BC857A a także rezystory dobrane z szeregu E24. Wykaz zastosowanych elementów oraz ich dane katalogowe znajdują się w dodatku 9.1.

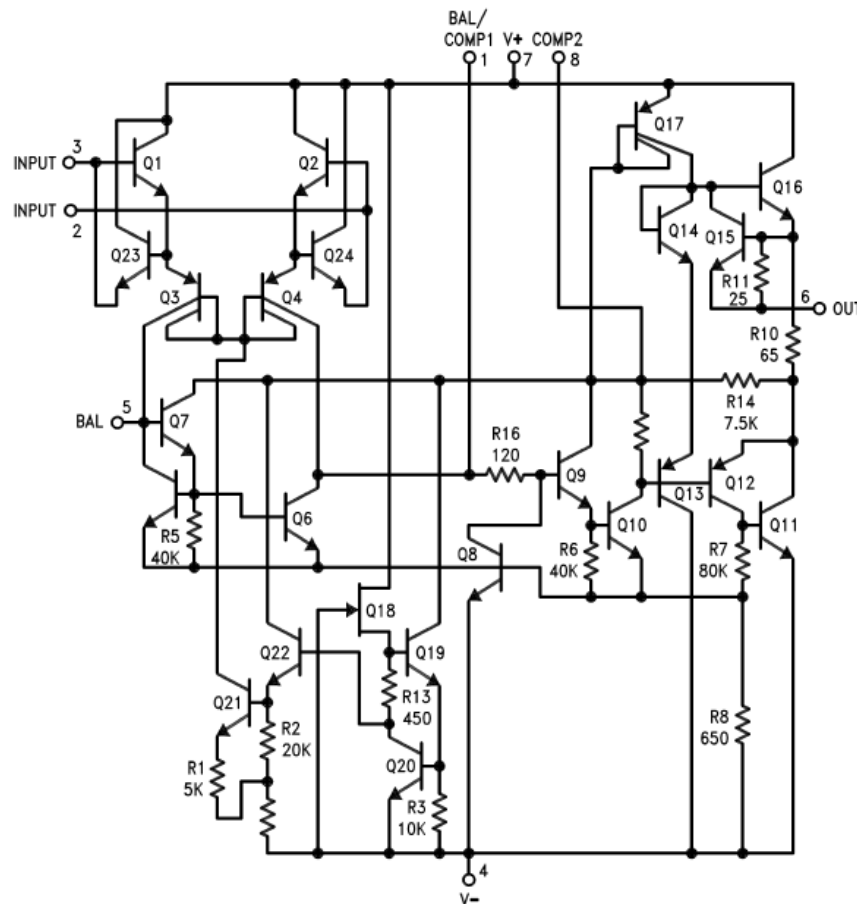
## 2. Przegląd literatury i rozwiązań układowych

Wzmacniacze operacyjne są podstawowymi elementami budowy większości układów elektronicznych. Podstawą każdego wzmacniacza operacyjnego jest wzmacniacz różnicowy, z którego sygnał jest kierowany na kolejne stopnie.

### 2.1. LM101A

Układ LM101 jest jednym z pierwszych produkowanych na szeroką skalę scalonych wzmacniaczy operacyjnych i z tego powodu jest szeroko opisywany w literaturze.

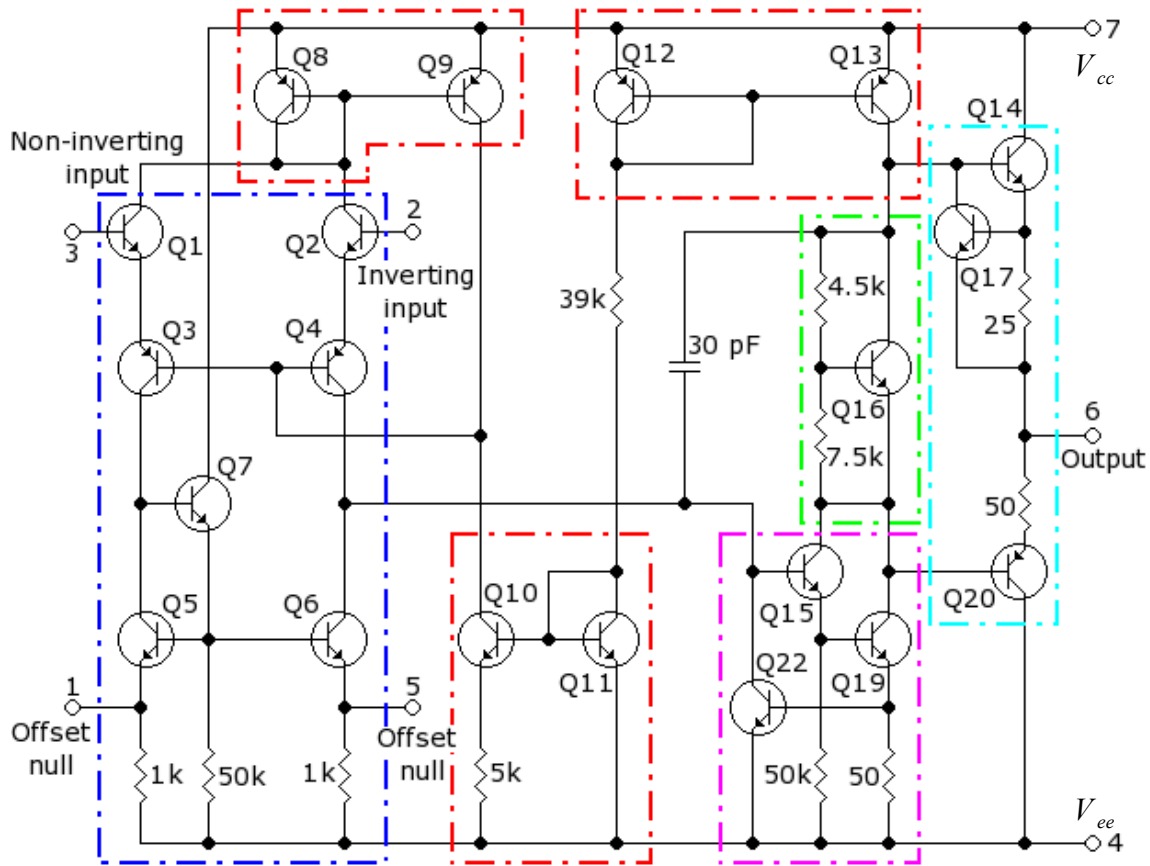
Jego wzmocnienie wynosi około  $160k \frac{V}{V}$ . Jedną z jego praktyczniejszych funkcji jest zabezpieczenie przeciwzwarciowe.



Rysunek 2.1: Schemat elektryczny układu LM101A

## 2.2. $\mu A741$

Jednym z najczęściej spotykanych układów w literaturze jest  $\mu A741$  jest niejako sukcesorem układu LM101. Jego schemat elektryczny znajduje się na Rysunku 2.2.



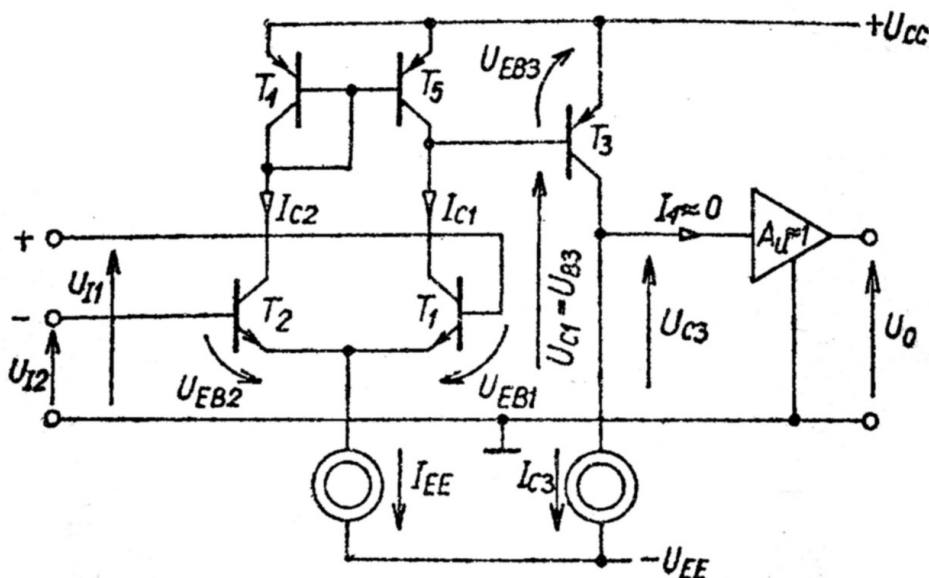
Rysunek 2.2: Schemat ideowy wzmacniacza typu 741.

Jest to jeden z pierwszych powszechnie stosowanych wzmacniaczy operacyjnych. Stosowany do dziś pomimo wewnętrznej kompensacji częstotliwościowej. Aplikowany częściej od układu  $\mu A748$  posiadającego identyczne parametry ale zewnętrzną kompensację częstotliwościową. Konkurencyjnym układem jest również LM324 o zbliżonych parametrach ale jego zasadniczą różnicą jest zastosowanie zasilania niesymetrycznego.

Postawę powyższego wzmacniacza stanowi układ pary różnicowej (ramka granatowa) opartej na tranzystorach  $Q_1$  i  $Q_2$  z możliwością regulacji napięcia zrównoważenia (tranzystory  $Q_5$  i  $Q_6$ ). Układ składa się również z trzech źródeł prądowych (ramki czerwone) ich prąd ustalany jest przez napięcie zasilania oraz rezystor 39k i wynosi w przybliżeniu  $\frac{V_{cc} - V_{ee} - 2 \cdot V_{be}}{39k}$ . Tranzystory  $Q_{12}$  i  $Q_{13}$  zasilają stopień wyjściowy – źródło napięciowe oparte o  $Q_{16}$  (ramka

zielona), komplementarny stopień wyjściowy AB (ramka niebieska) oraz wzmacniacz klasy AB (ramka purpurowa). Źródła oparte o  $Q_{10}$  i  $Q_{11}$  oraz  $Q_8$  i  $Q_{10}$  służą do kompensacji warunków stałoprądowych poprzez silne sprzężenie zwrotne oddziaływające na tranzystory  $Q_3$  i  $Q_4$ .

### 2.3. Uproszczony schemat wzmacniacza operacyjnego.



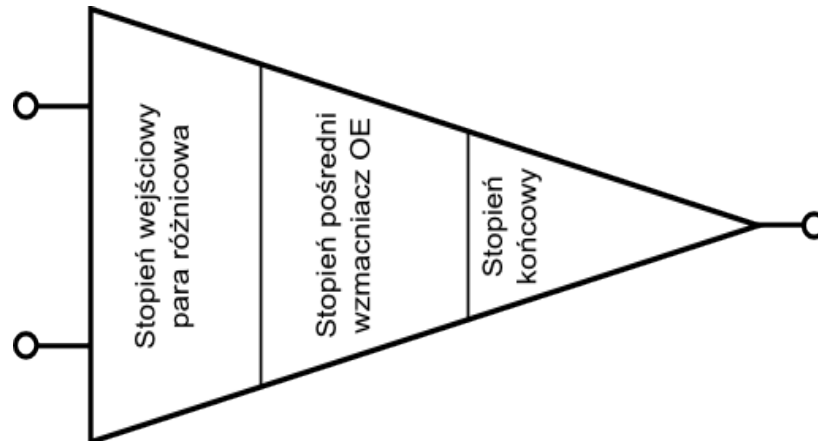
Rysunek 2.3: Uproszczony schemat wzmacniacza operacyjnego.

Powyższy schemat przedstawia uproszczony model typowego wzmacniacza operacyjnego o strukturze dwustopniowej. Jego pierwszy stopień to para różnicowa zasilana źródłem prądowym z obciążeniem aktywnym w postaci wtórnika prądowego [2; s.133]. Zastosowane rozwiązanie pozwala na dokładne ustalenie punktów pracy tranzystorów  $Q_1$  i  $Q_2$  oraz znaczne zmniejszenie współczynnika tłumienia składowej sumacyjnej (CMRR). Stopień drugi stanowi tranzystor bipolarny pnp w układzie wspólnego emitera.



### 3. Schemat układu

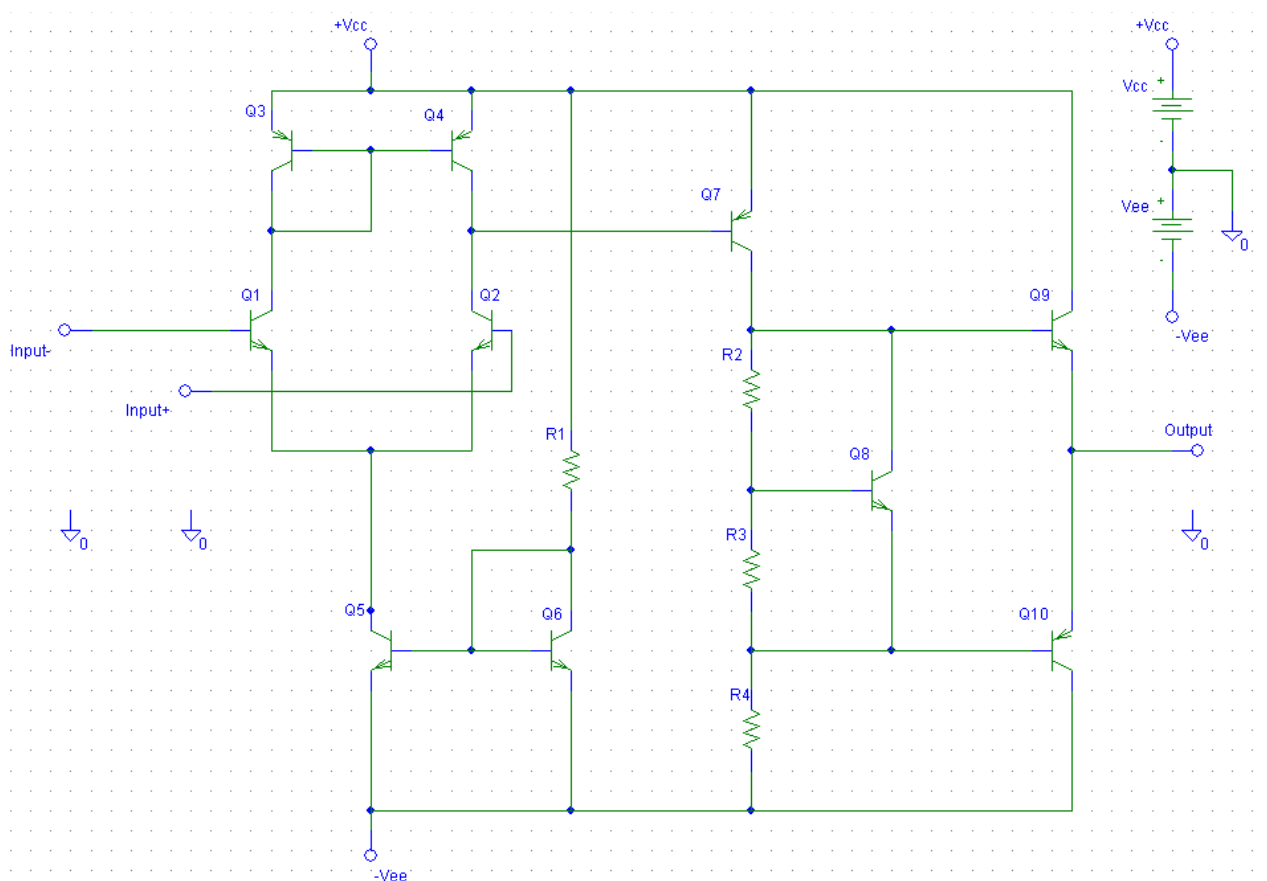
Po przeanalizowaniu rozwiązań przedstawionych w literaturze przyjęliśmy, że projektowany przez nas układ będzie miał budowę trójstopniową, którą reprezentuje rysunek 3.1. Przy jego projektowaniu braliśmy pod uwagę założenia projektowe oraz możliwie najprostszą budowę układu.



Rysunek 3.1: Schemat blokowy projektowanego wzmacniacza.

Jako rozwiązanie układowe przyjęliśmy obwód przedstawiony poprzednim rozdziale (rysunek 2.3). Do zasilania pary różnicowej wykorzystaliśmy układ lustra prądowego. Stopień wyjściowy stanowi para tranzystorów pracująca w klasie AB. Pomiedzy bazami tranzystorów wyjściowych ( $Q_9$  i  $Q_{10}$ ) znajduje się układ źródła napięciowego wymuszający polaryzację wstępną tych tranzystorów w celu pozbycia się zniekształceń skrośnych.

Szczegółowy schemat układu wykonany w programie PSpice przedstawia rysunek 3.2

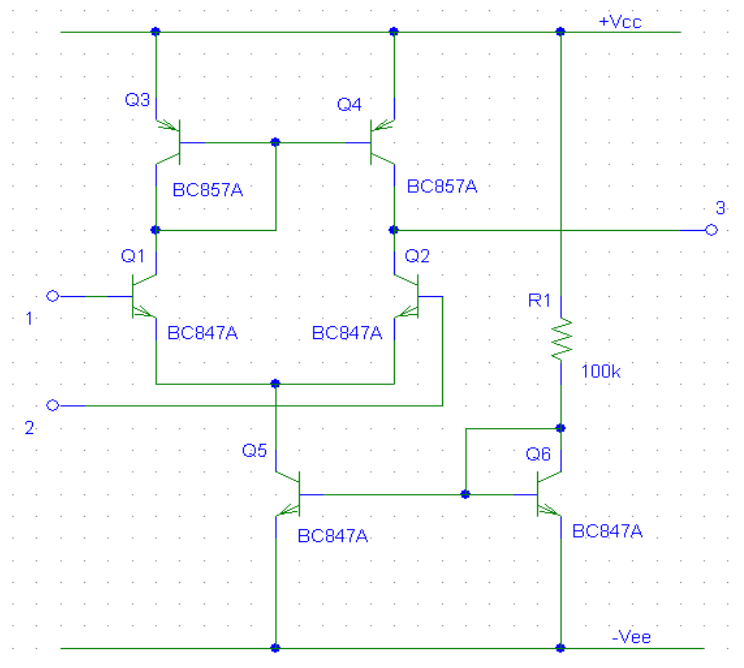


Rysunek 3.2: Schemat zaprojektowanego układu.

## 4. Analiza teoretyczna układu – obliczenia stałoprądowe

### 4.1. Stopień różnicowy

Pierwszy stopień projektowanego wzmacniacza przedstawiony jest na rysunku 4.1.



Rysunek 4.1: Schemat stopnia pierwszego

1 – wejście odwracające, 2 – wejście nieodwracające, 3 – wyjście -  $I_{bq7}$

#### a) wyznaczenie wartości rezystora ustalającego prąd zasilający parę różnicową.

Założenia:

$$I_{cq1} = I_{cq2} = 125 \mu A$$

$$V_{beq6} = 0,65 V$$

$$\beta_{05} = \beta_{06} = 180 \frac{V}{V}$$

Obliczenia:

prąd referencyjny źródła prądowego [4; wykład 8, s.26]

$$I_{ref} = (I_{cq1} + I_{cq2}) \cdot \left(1 + \frac{2}{\beta_{06}}\right) = 254 mA \quad (4.1.1)$$

wartość rezystancji  $R_1$

$$R_1 = \frac{V_{cc} + V_{ee} - V_{beq6}}{I_{ref}} = 94,45 \text{ k}\Omega \quad (4.1.2)$$

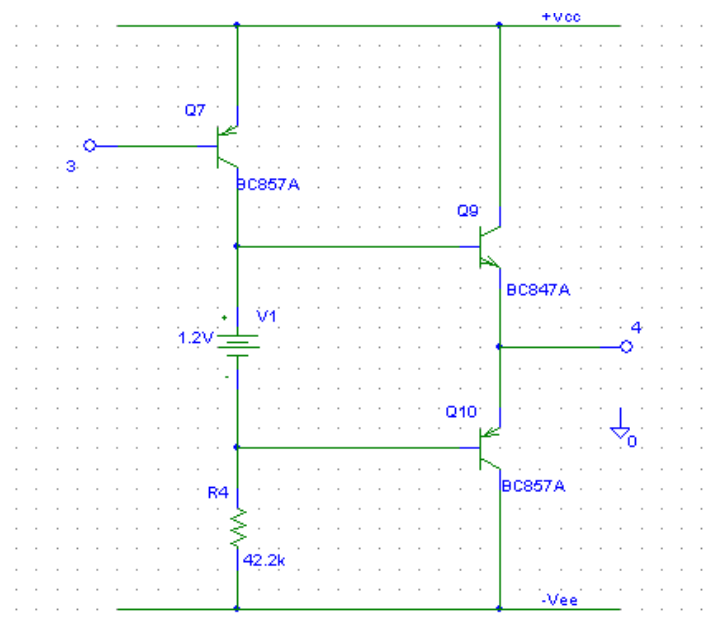
$$R_1 = 91 \text{ k}\Omega$$

#### b) prąd wyjściowy stopnia I

$$I_{bq7} = I_{cq4} - I_{cq2} = \frac{I_{cq1}}{\left(1 - \frac{2}{\beta_0}\right)\left(1 - \frac{1}{\beta_0}\right)} - I_{cq2} = 1,37 \mu A \quad (4.1.3)$$

### 4.2. Stopień wzmacniający i wyjściowy.

Ich schemat ideowy przedstawiony jest na rysunku 4.2.



Rysunek 4.2: Stopień wzmacniający i wyjściowy  
3 - wejście, 4 - wyjście

#### a) rezystor $R_4$

Obliczamy go tak aby uzyskać na zacisku wyjściowym napięcie  $V_i \approx 0V$ .

Założenia:

$$V_{be10} = 0.6V$$

$$I_{bq7} = 1.37 \mu A$$

Obliczenia:

$$I_{cq7} = I_{bq7} \cdot \beta_7 = 246 \mu A \quad (4.2.1)$$

$$R_4 = \frac{V_{ee} - V_{be10}}{I_{cq7}} = 46 k \Omega \quad (4.2.2)$$

$$R_4 = 47 k \Omega$$

## **b) źródło napięciowe**

Wartości elementów dobieramy dla napięcia źródła  $V_{src} \approx 1.2V$  [5; wzm. mocy, s.30]

Założenia:

$$V_{src} = 2 \cdot V_{be8}$$

Obliczenia:

$$V_{src} = \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) \cdot V_{be8} \rightarrow R_2 = R_3 \cdot \left(\frac{V_{src}}{V_{be8}} - 1\right) \rightarrow R_2 = R_3 \quad (4.2.3)$$

$$R_2 = 10 k \Omega$$

$$R_3 = 10 k \Omega$$

## 5. Analiza teoretyczna układu – obliczenia zmiennoprądowe

### 5.1. Wzmocnienie I stopnia

Założenia:

$$g_{m4}=5,30 \cdot 10^{-3} \text{ (pspice)}$$

$$g_{m7}=1,06 \cdot 10^{-2} \text{ (pspice)}$$

$$\beta_{04}=\beta_{07}=180 \text{ (dane katalogowe)}$$

Obliczenia:

$$R_{obc} = \frac{r_{b'e7} \cdot r_{ce4}}{r_{b'e7} + r_{ce4}} = 16,347 \text{ k}\Omega \quad (5.1.1)$$

$$r_{b'e7} = \frac{\beta_0}{g_{m7}} = 16,981 \text{ k}\Omega \quad (5.1.2)$$

$$r_{ce4} = \frac{V_A}{I_{cq4}} = 43,790 \text{ k}\Omega \quad (5.1.3)$$

$$K_{ur1} = -g_{m4} \cdot R_{obc} = 86 \frac{V}{V} \quad (5.1.4)$$

### 5.2. Wzmocnienie II stopnia

Założenia:

$$\Phi_T = \frac{k \cdot T}{q} = 26 \text{ mV dla } T = 300 \text{ K}$$

Obliczenia:

$$R_l \approx \frac{V_{ee} + V_{be9}}{I_{cq6}} \quad (5.2.1)$$

$$g_m = \frac{I_c}{\Phi_T} \quad (5.2.2)$$

$$K_{ur2} = -g_m \cdot R_l = \frac{I_c}{\Phi_T} \cdot \frac{V_{ee} + V_{be9}}{I_{cq7}} = 484,62 \frac{V}{V} \quad (5.2.3)$$

### 5.3. Wzmocnienie całkowite

$$K_{ur} = K_{ur1} \cdot K_{ur2} \approx 41624 \frac{V}{V} = 92,4 \text{ dB} \quad (5.3.1)$$

### 5.4. Wzmocnienie sumacyjne

Założenia:

$$I_{cq5} = 2,79 \cdot 10^{-4}$$

Obliczenia:

$$R_{obc} = \frac{r_{b'e7} \cdot r_{ce4}}{r_{b'e7} + r_{ce4}} = 16,347 \text{ k } \Omega \quad (5.4.1)$$

$$R_{dyn} = \frac{V_A}{I_{cq5}} = 35,842 \text{ k } \Omega \quad (5.4.2)$$

$$K_{us} = \frac{-R_{obc}}{2 \cdot R_{dyn}} = 2,28 \cdot 10^{-2} \frac{V}{V} \quad (5.4.3)$$

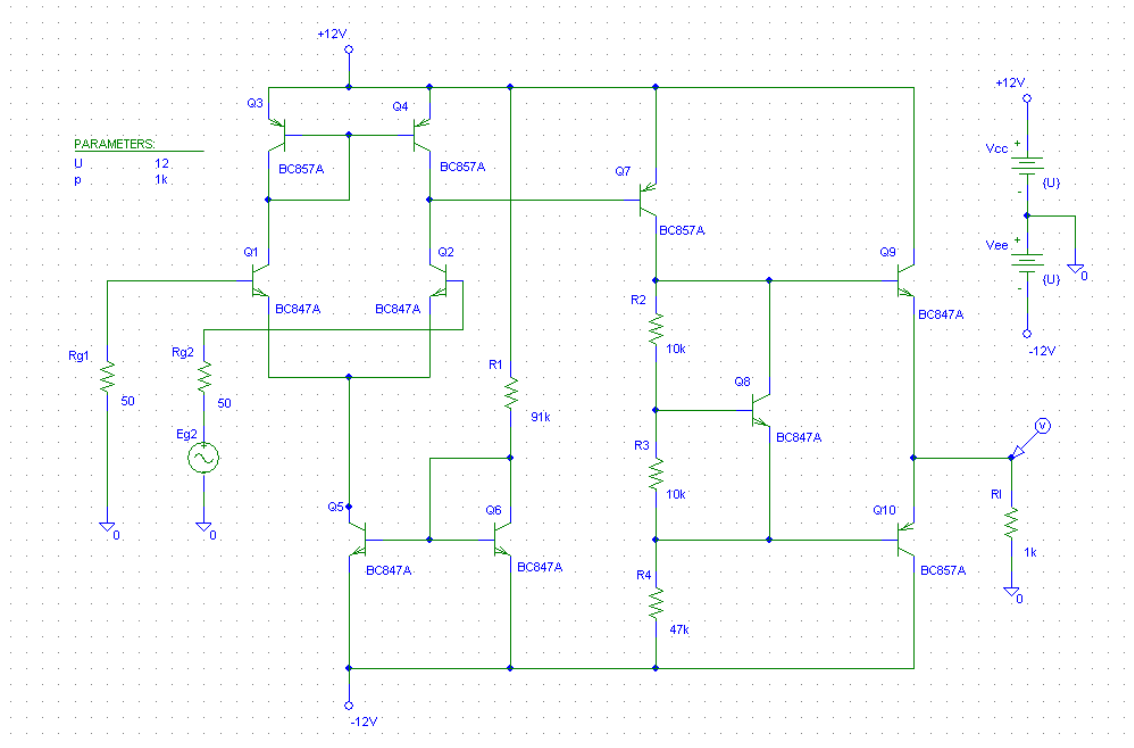
### 5.5. Współczynnik tłumienia składowej sumacyjnej

Obliczenia:

$$CMRR = \frac{K_{ur}}{K_{us}} = 3799 \frac{V}{V} = 71,594 \text{ dB} \quad (5.5.1)$$

## 6. Komputerowa symulacja zaprojektowanego układu

Po wstępnym zaprojektowaniu układu przystąpiliśmy do jego symulacji w programie PSpice w wersji 9.2. Schemat symulacji można znaleźć na rysunku 6.1.



Rysunek 6.1: Schemat symulowanego obwodu.

Układ zasililiśmy źródłami prądu stałego  $V_{cc}$  i  $V_{ee}$ . Do wejścia nieodwracającego wzmacniacza podłączyliśmy generator przebiegu sinusoidalnego  $E_{g2}$  o następujących parametrach:

$$DC = 0$$

$$AC = 1$$

$$VOFF = 0$$

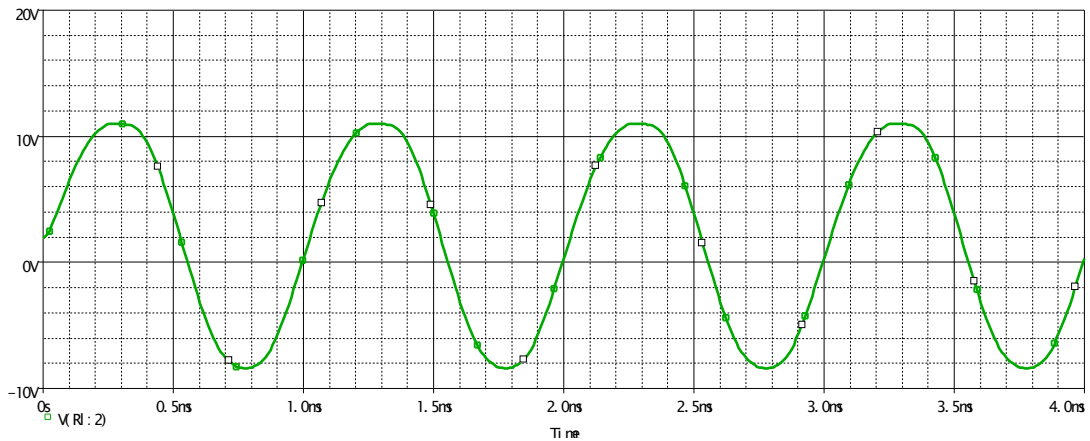
$$VAMPL = 330\mu$$

$$FREQ = 1k$$

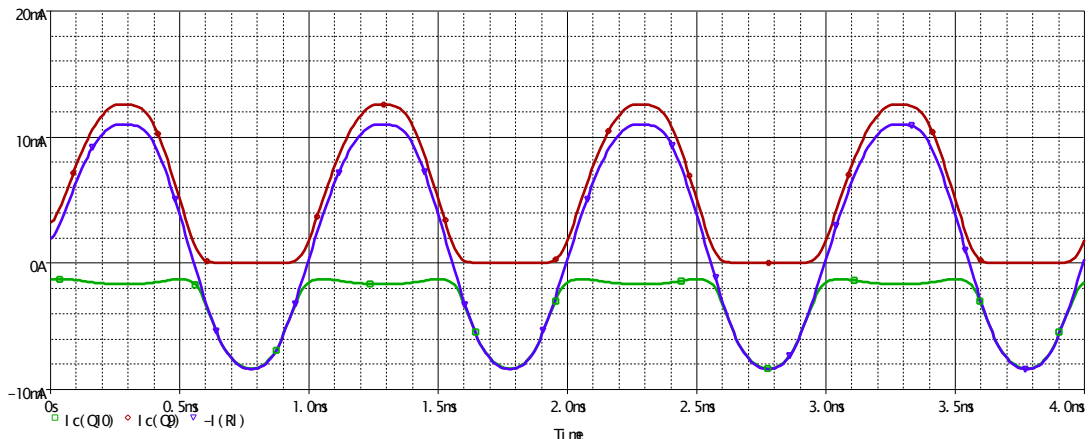
Na wyjście układu podłączyliśmy obciążenie w postaci rezystora  $R_l = 1k\Omega$ .



## 6.1. Symulacja czasowe układu.



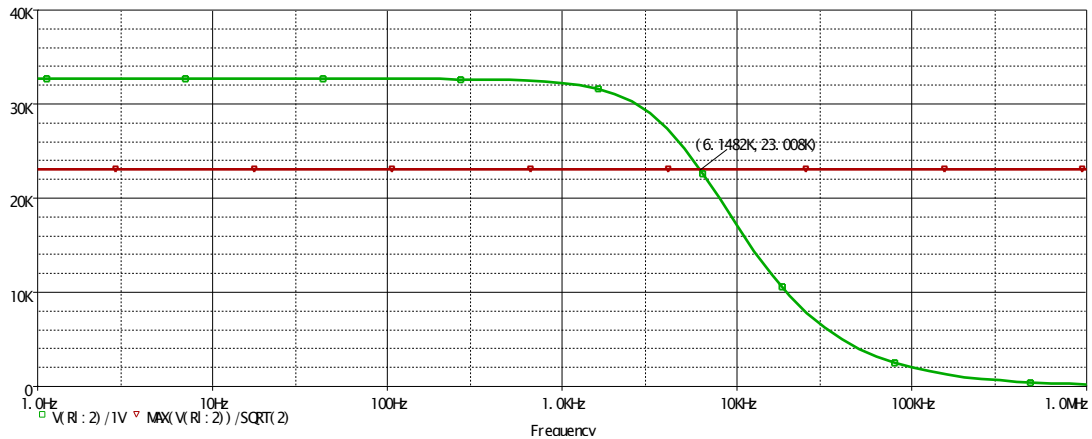
Rysunek 6.2: Symulacja czasowa układu (napięcie wyjściowe)



Rysunek 6.3: Symulacja czasowa układu (prąd stopnia wyjściowego i obciążenia)

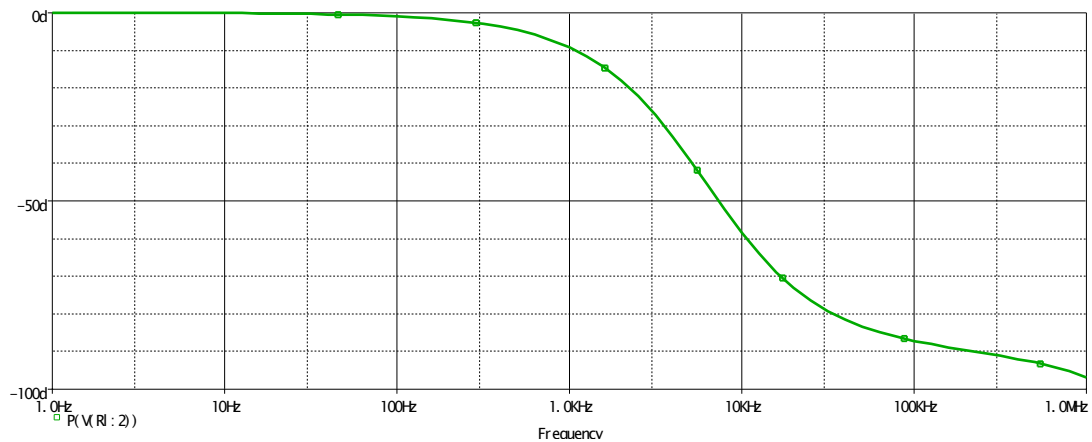
Obserwowane napięcie jest zgodne z przewidywaniami lecz ze względu na nieoczekiwaną wartość napięcia polaryzacji wyjściowej tranzystorów stopnia końcowego prądy ich kolektorów rozkładają się nierównomiernie. Natomiast za niezerową wartość średnia prądu wyjściowego przy pobudzeniu sinusoidalnym odpowiada wartość rezystora  $R_4$ .

## 6.2. Charakterystyki częstotliwościowe



Rysunek 6.4: Wzmocnienie układu w funkcji częstotliwości

Na wykresie (rysunek 6.4) przedstawiona jest charakterystyka amplitudowa układu w funkcji częstotliwości. Dodatkowo zaznaczona jest linia spadku sygnału o 3dB, która w miejscu przecięcia z wykresem wyznacza częstotliwość graniczną układu  $f_g = 6,148 \text{ kHz}$ .



Rysunek 6.5: Charakterystyka fazowa układu.

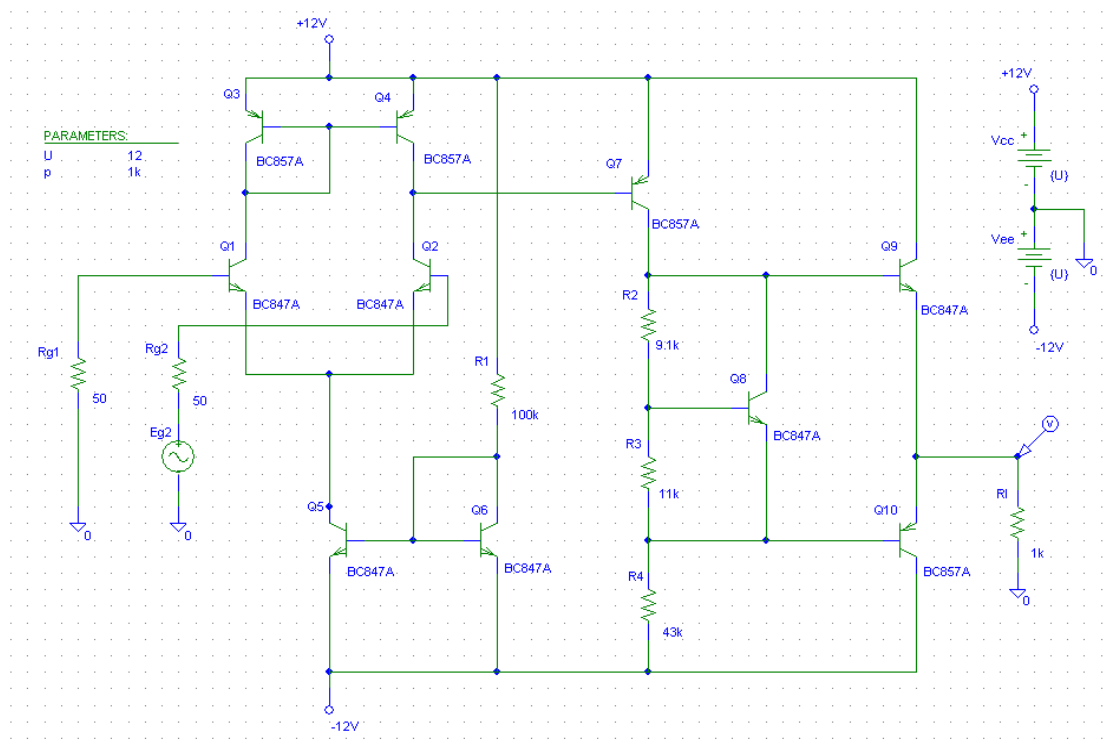
Na rysunku 6.5 przedstawiona jest charakterystyka fazowa badanego układu.

## 7. Komputerowa symulacja układu w postaci końcowej

Po wykonaniu poprzednich symulacji przystąpiliśmy do optymalizacji układu. Ponieważ źródło zasilające stopień pierwszy miało prąd niezgody z założeniami zwiększyliśmy wartość rezystancji  $R_1$  do  $100\text{ k}\Omega$  aby przybliżyć wartość prądu źródła do założonej wartości  $I_{eq1} + I_{eq2}$ . Następnie dostosowaliśmy rezystory  $R_2$  i  $R_3$  tak, aby oparte na nich źródło napięciowe miało wartość zbliżoną do założonej, co pozwoli na przeciwsobną pracę tranzystorów  $Q_9$  i  $Q_{10}$  oraz zapewni symetrię maksymalnych prądów wyjściowych. Ostatnim krokiem optymalizacji było dobranie rezystora  $R_4$  tak aby przy braku sygnałów wejściowych uzyskać zerowe napięcie wyjściowe.

Tabela 1: Porównanie wartości elementów.

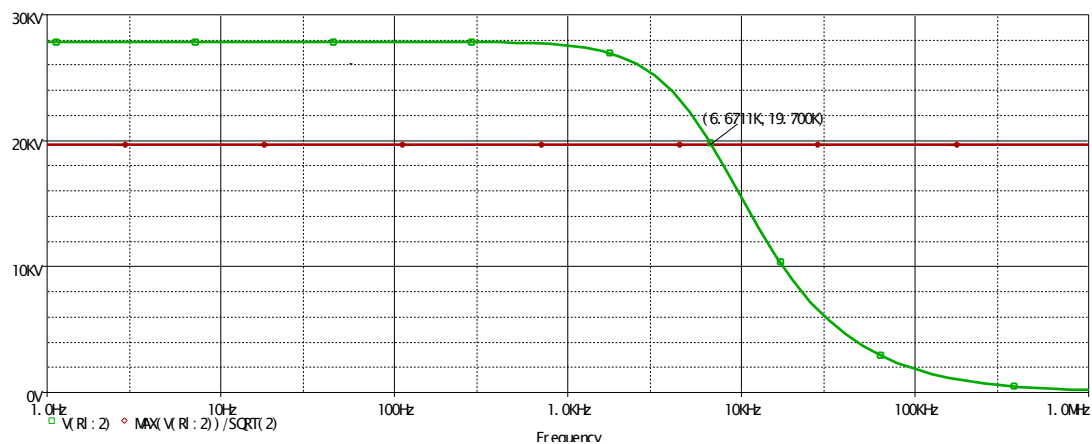
Symbol	Wartość Teoretyczna	Wartość Zoptymalizowana
$R_1$	$92\text{ k}\Omega$	$100\text{ k}\Omega$
$R_2$	$10\text{ k}\Omega$	$9.1\text{ k}\Omega$
$R_3$	$10\text{ k}\Omega$	$11\text{ k}\Omega$
$R_4$	$47\text{ k}\Omega$	$43\text{ k}\Omega$



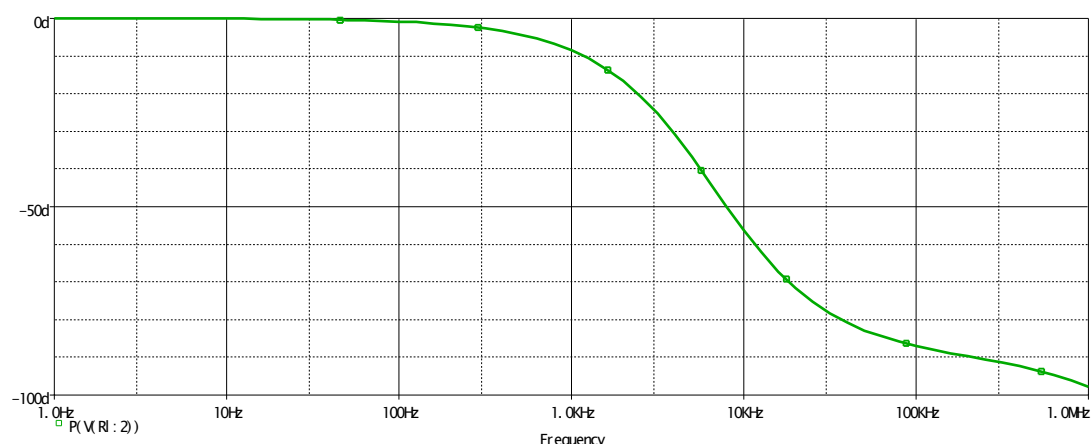
Rysunek 7.1: Schemat symulowanego obwodu.

## 7.1. Symulacja w dziedzinie częstotliwości.

### a) Charakterystyki częstotliwościowe



Rysunek 7.2: Wzmocnienie układu w funkcji częstotliwości.



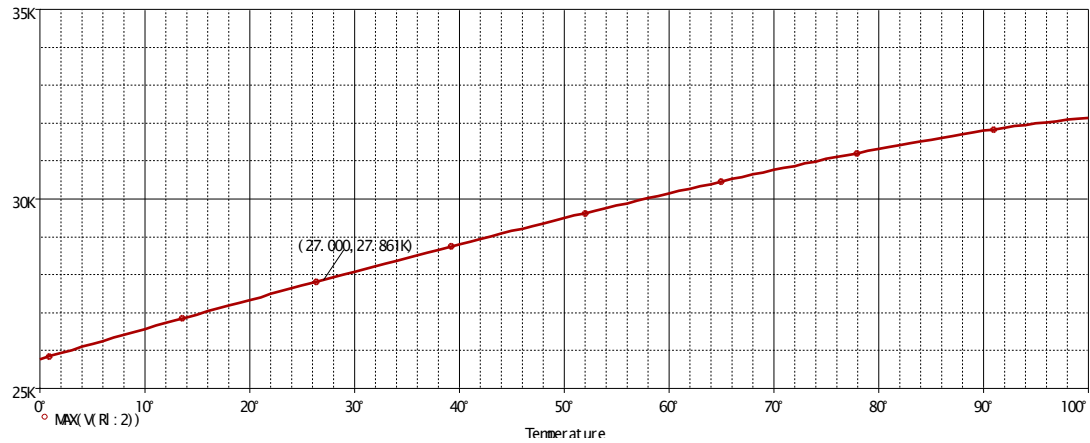
Rysunek 7.3: Charakterystyka fazowa układu.

Tabela 2: Porównanie parametrów.

Parametr	Wartość przed optymalizacją	Wartość po optymalizacji
$f_{gr}$	6,148 kHz	6,671 kHz
$K_u$	$32\,661 \frac{V}{V}$	$27\,861 \frac{V}{V}$
	90.3 dB	88,9 dB

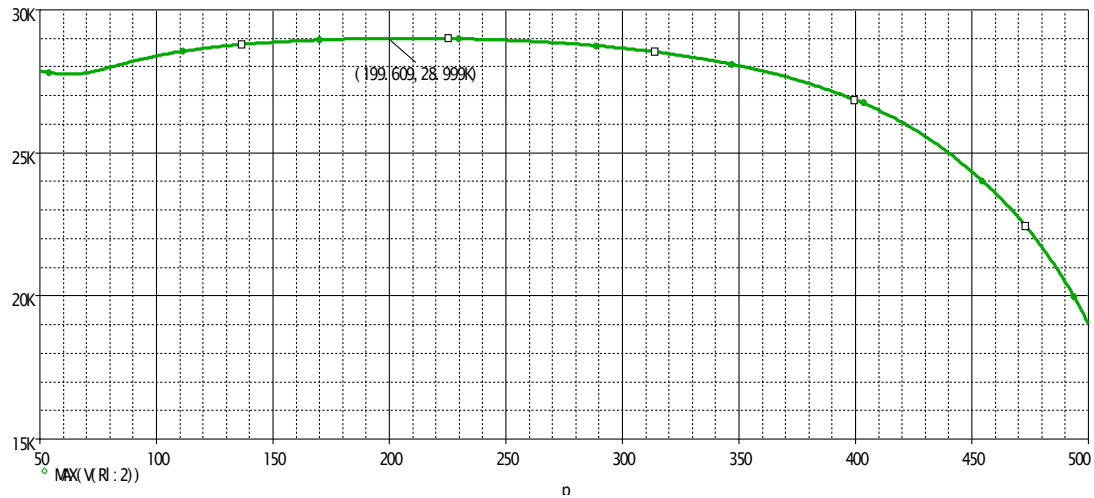
### b) Wpływ temperatury na wzmacnienie układu

Poniższa symulacja przedstawia zależność wzmacnienia napięciowego układu w zależności od jego temperatury.



Rysunek 7.4: Wpływ temperatury na wzmacnienie układu.

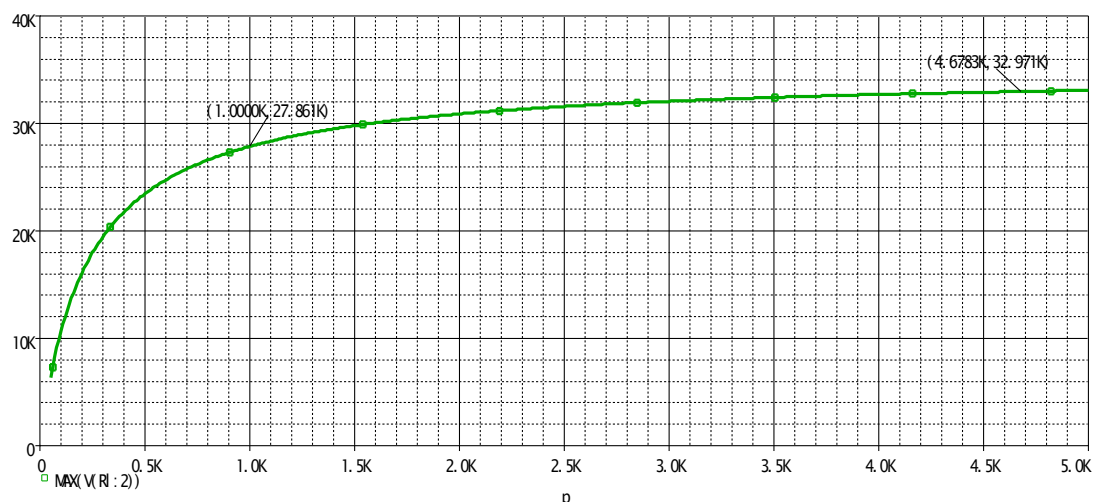
### c) Wpływ rezystancji generatora na wzmacnienie



Rysunek 7.5: Wykres zależności wzmacnienia od rezystancji generatora.

Dla zaprojektowanego układu największe wzmacnienie gwarantuje generator o rezystancji wewnętrznej z zakresu  $150 - 250 \Omega$ .

#### d) Wpływ rezystancji obciążenia na wzmacnienie układu

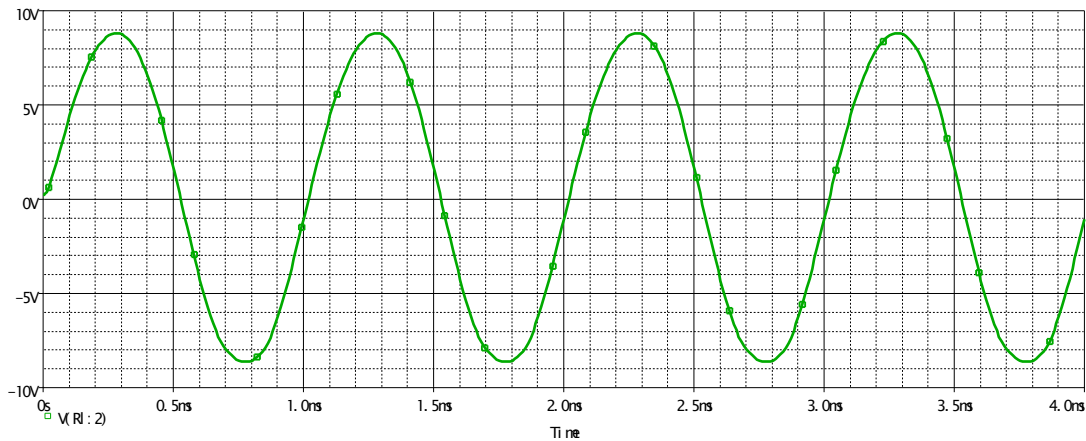


Rysunek 7.6: Wpływ rezystancji obciążenia na wzmacnienie układu.

## 7.2. Symulacja w dziedzinie czasu.

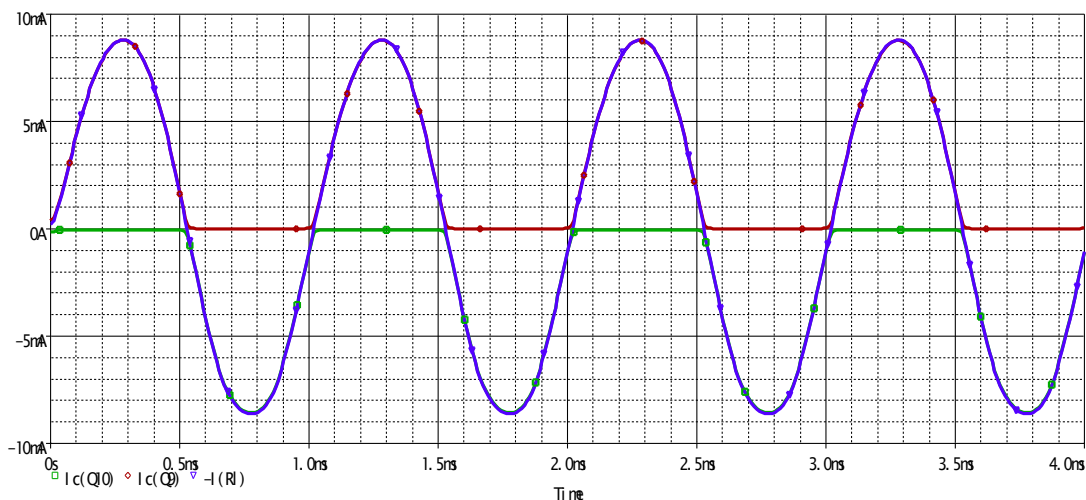
### a) Napięcie wyjściowe.

Układ za symulowaliśmy przy identycznych parametrach jak w rozdziale 6, lecz ze zmodyfikowanymi wartościami elementów.



Rysunek 7.7: Napięcie wyjściowe.

Jak można zaobserwować na powyższym wykresie wprowadzone zmiany poprawiły parametry wyjściowe układu. Wartość średnia napięcia wyjściowego spadła w przybliżeniu do zera.

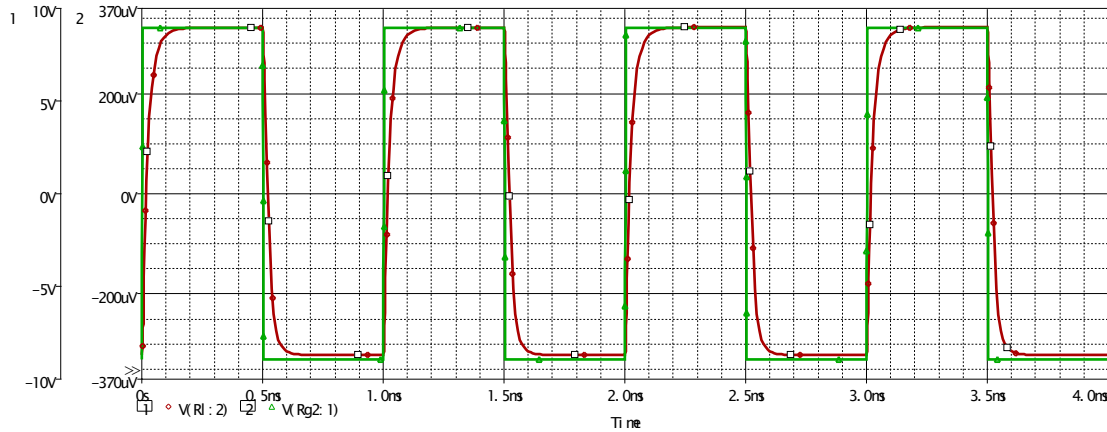


Rysunek 7.8: Symulacja czasowa układu (prąd stopnia wyjściowego i obciążenia).

Powyżej widać, że modyfikacja wartości elementów pozytywnie wpłynęła na pracę stopnia wyjściowego. Transzystory przy tak dobranej polaryzacji wstępnej pracują przeciwsośnie.

### b) Reakcja na pobudzenie sygnałem prostokątnym

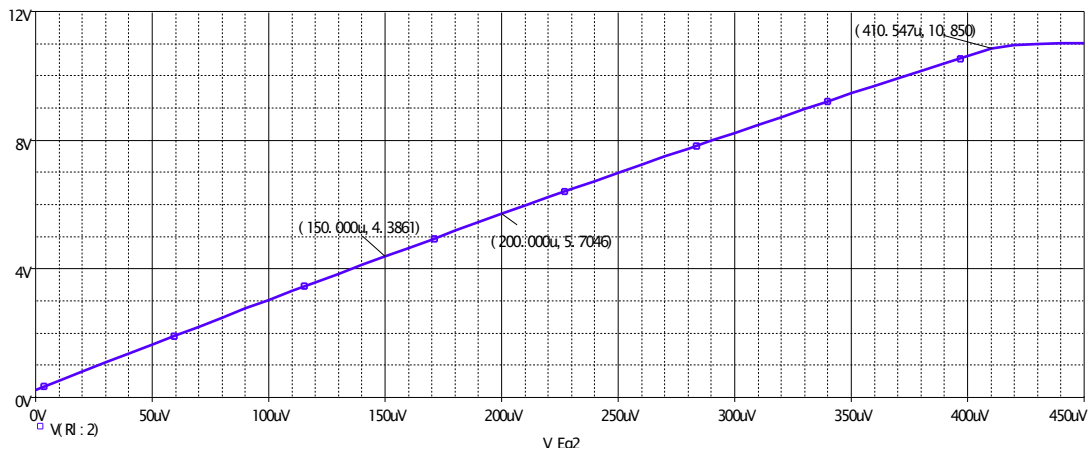
Przeprowadziliśmy symulację pokazującą reakcję na pobudzenie sygnałem prostokątnym. Na poniższym wykresie skorelowano obydwa te sygnały aby można było porównać różnice.



Rysunek 7.9: Odpowiedź i pobudzenie

### c) Charakterystyka przejściowa układu.

Poniżej przedstawiona jest napięciowa charakterystyka przejściowa układu.



Rysunek 7.10: Charakterystyka przejściowa

Charakterystyka przejściowa ma charakter liniowy w zakresie napięć wejściowych

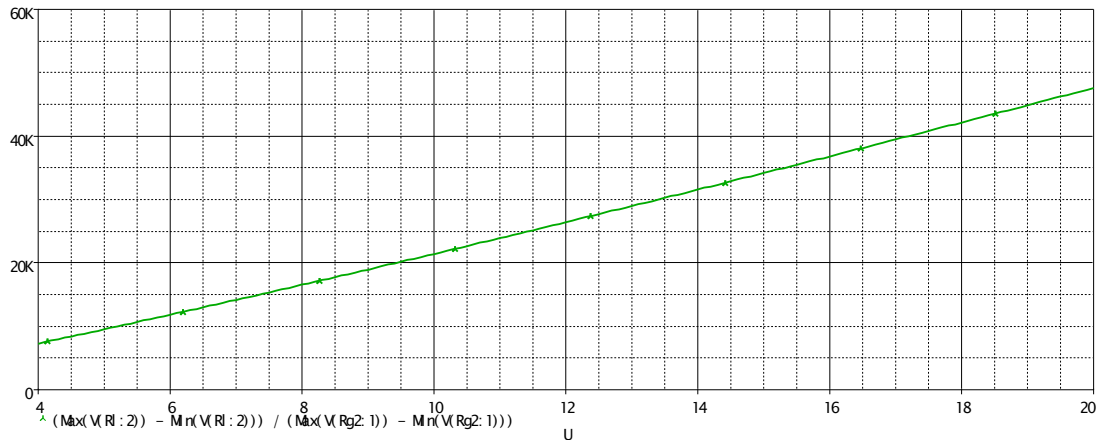
$0 - 430 \mu V$ . Małosygnałowe wzmocnienie napięciowe wynosi  $K_u = \frac{\Delta V_l}{\Delta E_g} \approx 26,370 k \frac{V}{V}$  natomiast

wielkosygnałowe wzmocnienie wynosi  $K_u' = \frac{V_{lmax}}{E_{gmax}} \approx 26,461 k \frac{V}{V}$



#### d) Wpływ napięcia zasilania

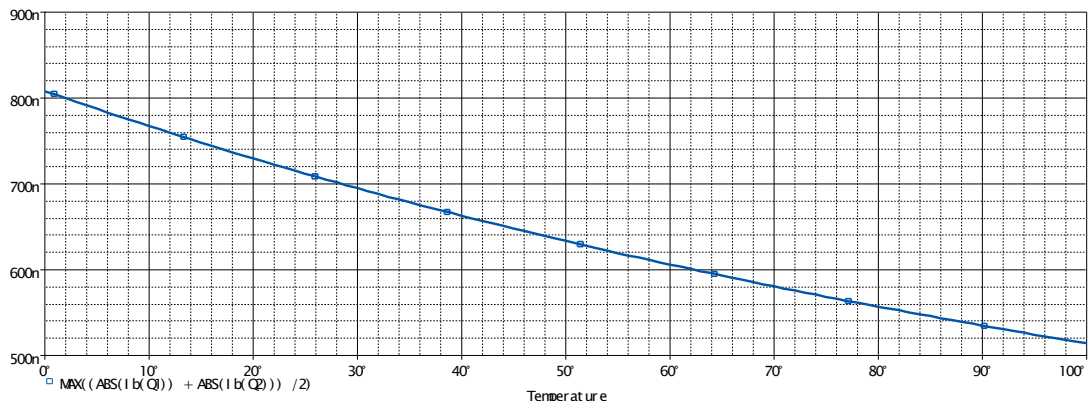
Przeprowadziliśmy symulację wpływu napięcia zasilania na wzmocnienie układu.



Rysunek 7.11: Wykres zależności wzmocnienia od napięcia zasilającego.

#### e) Wejściowe prądy polaryzacji

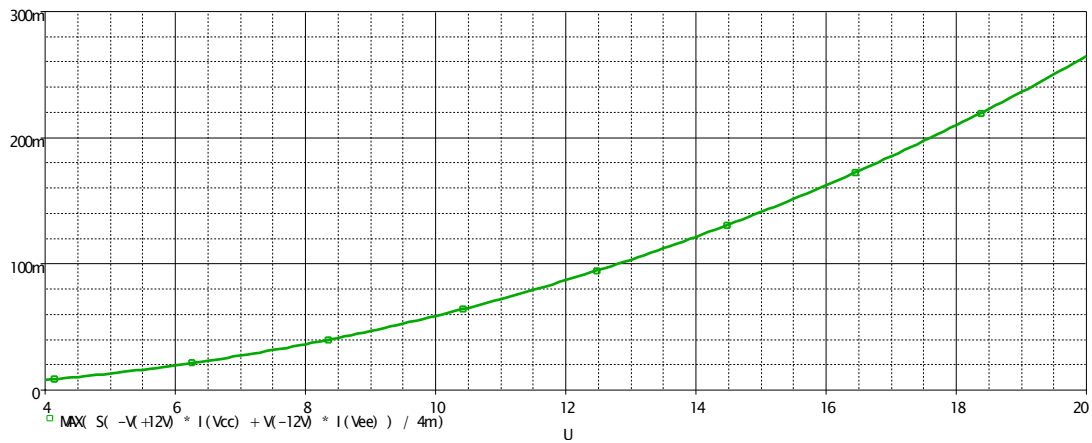
Kolejna analiza wykazuje wpływ temperatury na wejściowe prądy polaryzacji.



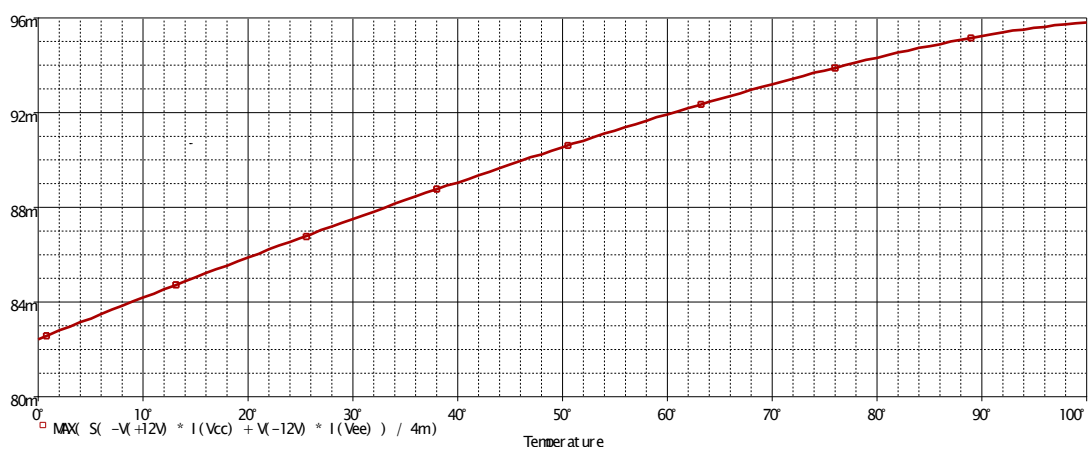
Rysunek 7.12: Zależność wejściowych prądów polaryzacji od temperatury.

## f) Pobór mocy

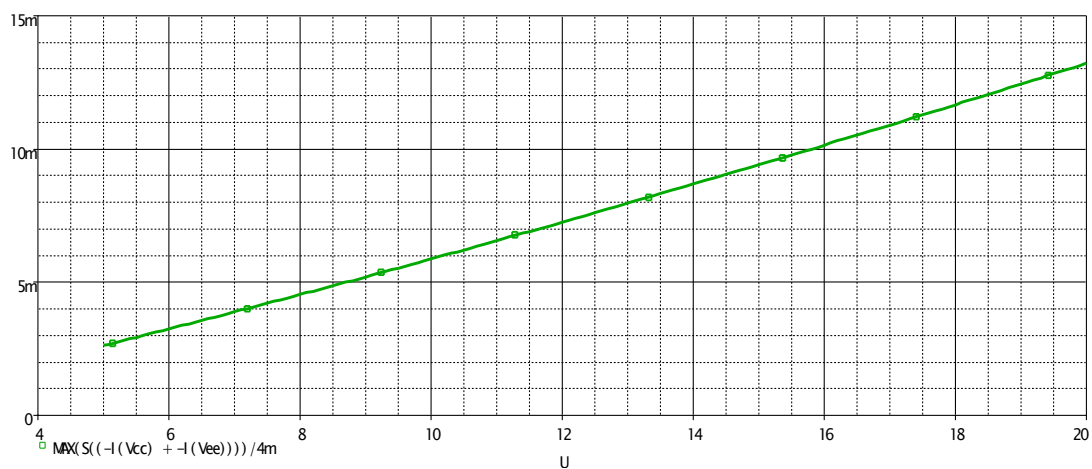
Kolejna symulacja pokazuje zależność poboru mocy od napięcia zasilającego o raz temperatury.



Rysunek 7.13: Zależność poboru mocy od napięcia zasilającego.

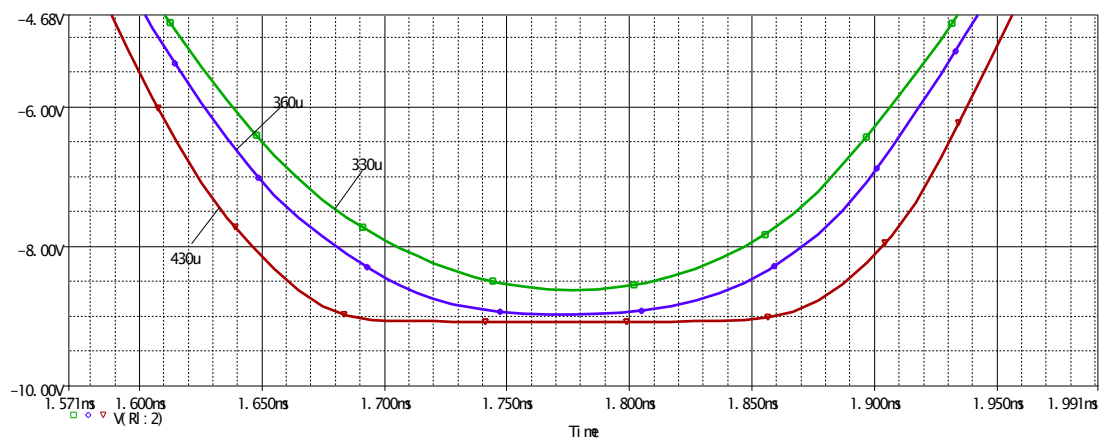


Rysunek 7.14: Zależność poboru mocy od temperatury.



Rysunek 7.15: Zależność prądu zasilającego od napięcia zasilającego

### g) Wpływ wartości napięcia wejściowego na odpowiedź układu



Rysunek 7.16: Wykres napięcia wyjściowego.

Sygnały o napięciu większym od  $360\mu A$  są zniekształcane na wyjściu. Na wykresie, który przedstawia rysunek 7.16 widać charakterystyczne „ucinanie” wyjściowego sygnału.

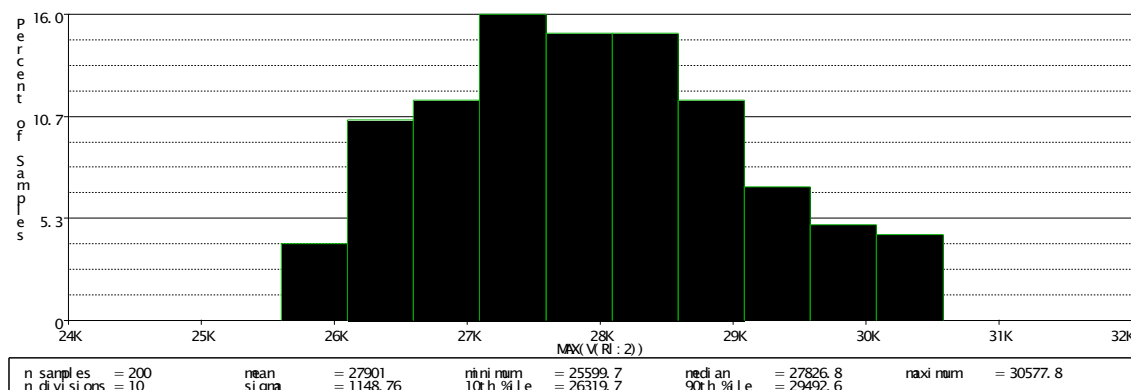
### h) Współczynnik tłumienia składowej sumacyjnej

Współczynnik CMRR wyznaczony programem PSpice wynosi:

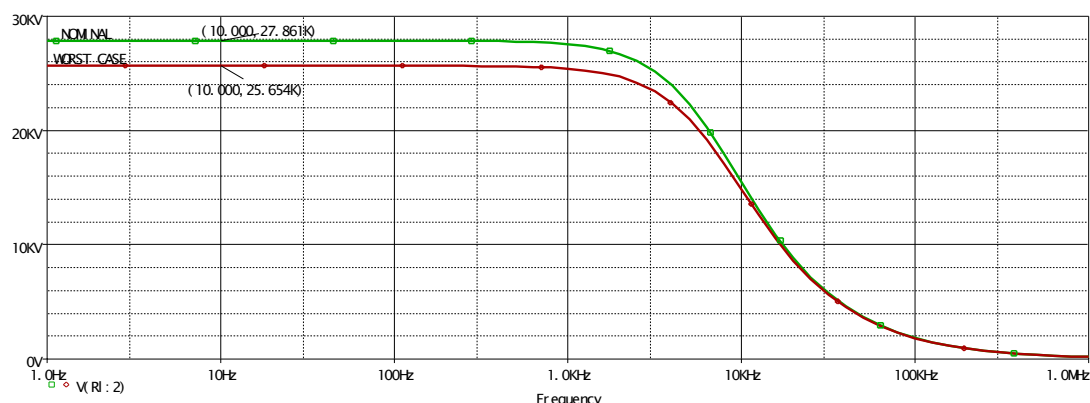
$$CMRR = 87,982\text{ dB}$$

### 7.3. Analiza Monte Carlo i Worst Case.

Analiza ta pozwala określić wpływ rozrzutu produkcyjnego elementów na parametry zmontowanego układu. Symulacja została tak ustawiona aby wartości rezystorów przyjmowane były z 5% szeregu E24.



Rysunek 7.17: Histogram wzmocnienia napięciowego.

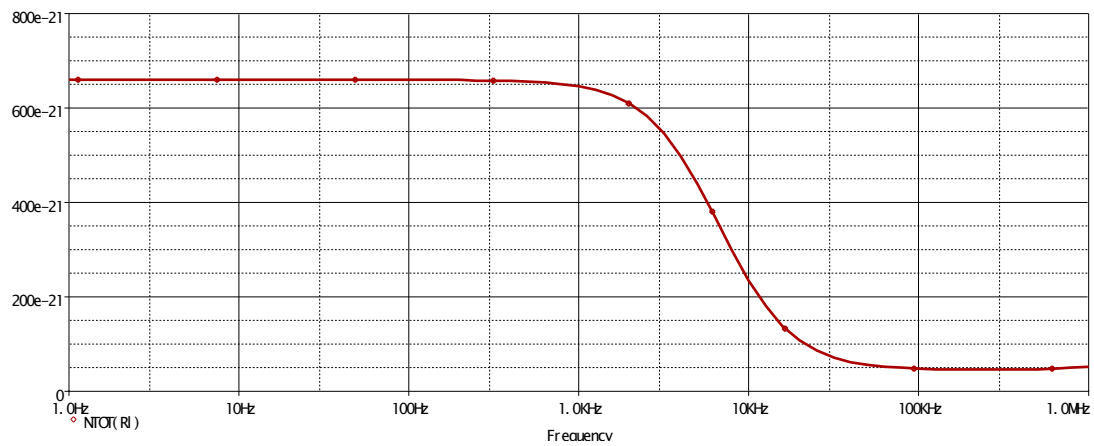


Rysunek 7.18: Najgorszy przypadek wzmocnienia napięciowego.

Na powyższych wykresach można zauważyć jak poważny wpływ ma rozrzut rezystancji na parametry układu.

#### 7.4. Analiza szumów.

Na poniższym wykresie przedstawiony jest całkowity szum generowany przez układ na obciążeniu.



Rysunek 7.19: Całkowity szum generowany na obciążeniu.

## 8. Wnioski

Z przeprowadzonych analiz wynika, że układ pracuje prawidłowo, drobne rozbieżności pomiędzy wartościami elementów wyliczonymi teoretycznie a uzyskanymi przy pomocy symulacji w programie PSpice wynikają z niedokładności obliczeniowej zastosowanych wzorów.

Optymalizacja wstępnie dobranych wartości elementów układu przyniosła poprawę parametrów układu. Niemniej jednak odbyło się to kosztem drobnego spadku wzmocnienia napięciowego układu.

Poprawę parametrów można by uzyskać gdyby wartości rezystancji nie były dobierane z szeregu E24. Stanowi to pewne ograniczenie konstrukcyjne układu opartego na elementach dyskretnych i dlatego układy tego typu są wykonywane jako obwody scalone gdzie można dokładnie dopasować elementy do potrzeb układu.

Jednak pomimo iż dowiedliśmy poprawnego działania układu analiza Monte Carlo wykazała duży rozrzut amplitudy wyjściowej spowodowany zastosowaniem elementów rezystancyjnych o tolerancji 5%.

## 9. Dodatki

### 9.1. Zastosowane Elementy

#### a) Elementy aktywne

Tabela 3: Wykaz parametrów elementów aktywnych

Symbol	Model	Obudowa
$Q_1, Q_2, Q_5, Q_6, Q_8, Q_9$	BC847A	SOT23
$Q_3, Q_4, Q_7, Q_{10}$	BC847A	SOT23

#### b) Elementy bierne

Tabela 4: Wykaz parametrów elementów biernych

Symbol	Wartość	Obudowa
$R_1$	$100\text{ k}\Omega$	402
$R_2$	$9\text{ k}\Omega$	402
$R_3$	$11\text{ k}\Omega$	402
$R_4$	$43\text{ k}\Omega$	402
$R_l$	$1\text{ k}\Omega$	N/A
$R_g$	$50\text{ }\Omega$	N/A

#### c) Specyfikacje zastosowanych elementów

Szczegółowe specyfikacje zastosowanych w układzie elementów znajdują się na załączonej płycie CD w katalogu \datasheet.

## 9.2. Parametry tranzystorów z programu PSpice

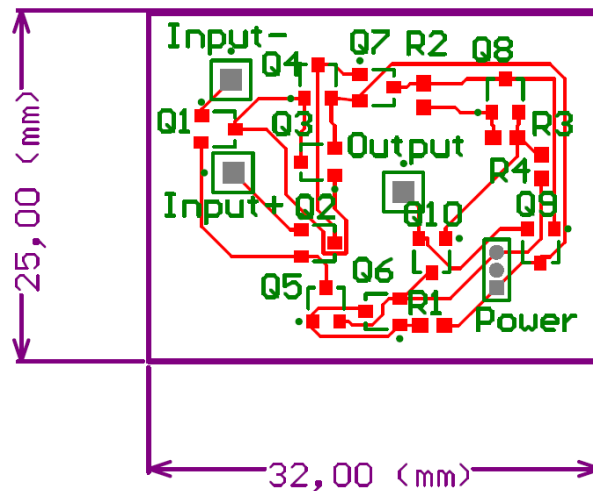
NAME	Q_Q3	Q_Q6	Q_Q8	Q_Q5	Q_Q7
MODEL	BC857A	BC847A	BC847A	BC847A	BC857A
IB	-8.33E-07	1.52E-06	1.29E-06	1.52E-06	-1.62E-06
IC	-1.37E-04	2.54E-04	2.15E-04	2.79E-04	-2.96E-04
VBE	-5.13E-01	6.29E-01	6.24E-01	6.29E-01	-5.31E-01
VBC	0.00E+00	0.00E+00	-6.37E-01	-1.08E+01	8.79E+00
VCE	-5.13E-01	6.29E-01	1.26E+00	1.14E+01	-9.32E+00
BETADC	1.65E+02	1.67E+02	1.67E+02	1.84E+02	1.83E+02
GM	5.30E-03	9.79E-03	8.30E-03	1.08E-02	1.14E-02
RPI	3.24E+04	1.76E+04	2.09E+04	1.76E+04	1.65E+04
RX	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
RO	7.78E+05	4.21E+05	5.00E+05	4.21E+05	3.90E+05
CBE	1.86E-11	2.45E-11	2.34E-11	2.51E-11	2.27E-11
CBC	1.15E-11	7.29E-12	5.54E-12	2.58E-12	3.99E-12
CJS	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
BETAAC	1.72E+02	1.73E+02	1.73E+02	1.90E+02	1.88E+02
CBX/CBX2	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
FT/FT2	2.80E+07	4.91E+07	4.56E+07	6.19E+07	6.82E+07

NAME	Q_Q4	Q_Q2	Q_Q1	Q_Q10	Q_Q9
MODEL	BC857A	BC847A	BC847A	BC857A	BC847A
IB	-8.33E-07	7.71E-07	7.71E-07	-6.67E-06	1.74E-05
IC	-1.37E-04	1.39E-04	1.39E-04	-1.30E-03	3.27E-03
VBE	-5.13E-01	6.10E-01	6.10E-01	-5.68E-01	6.93E-01
VBC	1.79E-02	-1.15E+01	-1.15E+01	1.34E+01	-9.32E+00
VCE	-5.31E-01	1.21E+01	1.21E+01	-1.40E+01	1.00E+01
BETADC	1.65E+02	1.80E+02	1.80E+02	1.95E+02	1.88E+02
GM	5.30E-03	5.36E-03	5.36E-03	4.97E-02	1.23E-01
RPI	3.24E+04	3.51E+04	3.51E+04	3.94E+03	1.50E+03
RX	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
RO	7.78E+05	8.51E+05	8.51E+05	9.25E+04	3.55E+04
CBE	1.86E-11	2.12E-11	2.12E-11	4.65E-11	1.01E-10
CBC	1.14E-11	2.53E-12	2.53E-12	3.45E-12	2.70E-12
CJS	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
BETAAC	1.72E+02	1.88E+02	1.88E+02	1.96E+02	1.85E+02
CBX/CBX2	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
FT/FT2	2.81E+07	3.59E+07	3.59E+07	1.59E+08	1.90E+08

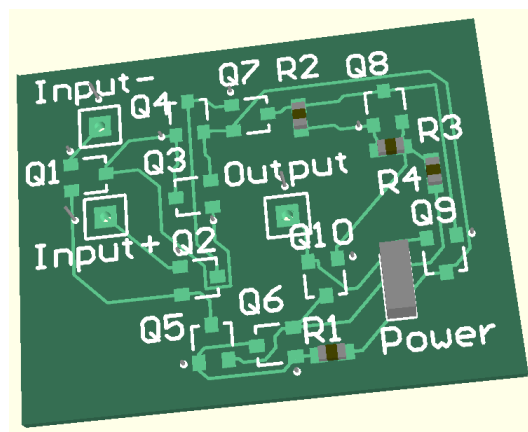


### 9.3. Wzór obwodu drukowanego

Wzór obwodu drukowanego wykonaliśmy w programie Altium Designer 6. Do jego projektowania wykorzystaliśmy funkcje Auto Placer oraz Auto Router. Program pozwala również wyświetlić wizualizację zmontowanego obwodu widoczną na rysunku 9.2.



Rysunek 9.1: Wzór obwodu drukowanego.



Rysunek 9.2: Wizualizacja obwodu drukowanego.

## 10. Bibliografia

- [1] W. Golde, L. Śliwa – „*Wzmacniacze operacyjne i ich zastosowanie. Cz. 1*”
- [2] Z. Kulka, M. Nadachowski – „*Wzmacniacze operacyjne i ich zastosowanie. Cz. 2*”
- [3] P. Horowitz, W. Hill – „*Sztuka Elektroniki*” Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1995
- [4] J. Witkowski – „*Układy Elektroniczne 1 – Wykład*”
- [5] M. Kukawczyński – „*Układy Elektroniczne 1 – Wykład*”
- [6] Programy komputerowe:
  - OpenOffice 2
  - Cadence OrCAD 9.2
  - Mathematica 5.2
  - GiMP 2.2
  - Inkscape 0.44