

# Ćwiczenie nr 5

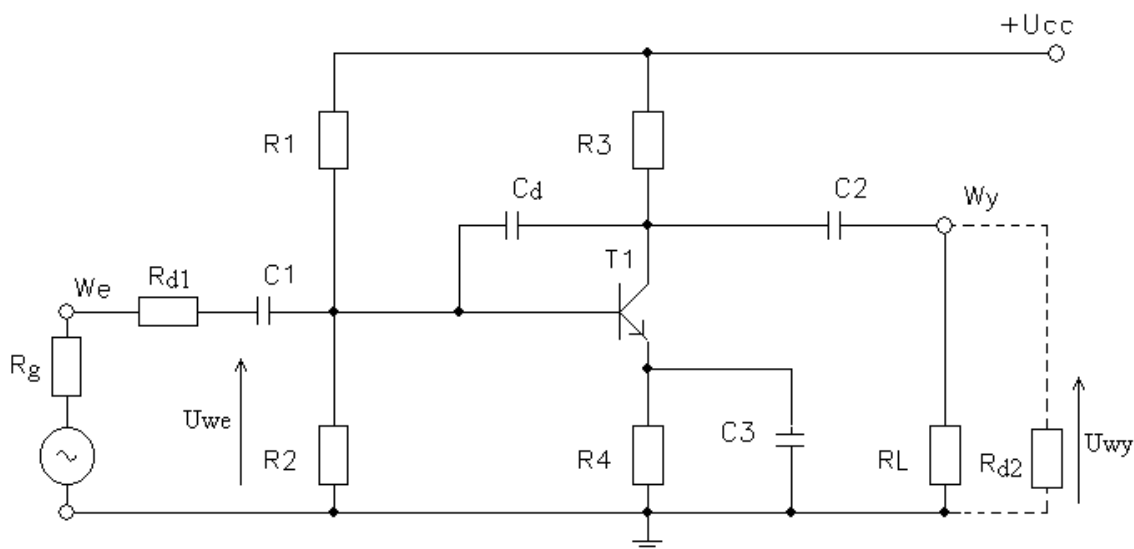
## „Wzmacniacz tranzystorowy”

### 1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie właściwości jednostopniowego, tranzystorowego wzmacniacza napięcia. Wyniki pomiarów parametrów samego tranzystora jak i całego układu wzmacniacza będą porównane z parametrami obliczonymi. Na podstawie porównania parametrów rzeczywistych i wyznaczonych teoretycznie możliwa będzie ocena dokładności stosowanej metody projektowania wzmacniacza.

### 2. Przygotowanie do wykonania ćwiczenia. Projekt wzmacniacza.

Tydzień przed wykonaniem pomiarów student otrzymuje od prowadzącego dane projektowe wzmacniacza tranzystorowego. Wzmacniacz zbudowany na tranzystorze bipolarnym BC 527 (rys.1), pracuje w układzie wspólnego emitera z rezystorem emiterowym zwieranym kondensatorem C3 dla sygnałów zmiennych. Baza tranzystora jest polaryzowana przez dzielnik napięciowy. Do obliczeń przyjąć parametry małosygnałowe tranzystora zawarte w Dodatku D. Algorytm wykonania obliczeń opisano w dodatku do instrukcji do ćwiczenia pt.: „Projektowanie wzmacniacza OE”.



Rys. 1. Schemat projektowanego wzmacniacza tranzystorowego

Poniżej, w Tabeli nr 1 umieszczono dane projektowanego układu wzmacniacza.

Tabela 1. Dane projektowe wzmacniacza tranzystorowego

$I_{cq}$ [mA]	$U_{ceq}$ [V]	$K_U$ [V/V]	$R_L$ [kΩ]	$U_{wymax}$ [V]	$f_g$ [kHz]

gdzie:

$I_{cq}$ ,  $U_{ceq}$  - są to prąd kolektora i napięcie kolektor – emiter tranzystora w punkcie pracy,

$K_U$  - jest wzmocnieniem napięciowym wzmacniacza  $K_U = \frac{U_{wy}}{U_{we}}$ ,

$R_L$  – rezystancją obciążenia,

$U_{wymax}$  – nieznieskształconą amplitudą napięcia wyjściowego wzmacniacza,

$f_g$  – górną częstotliwością graniczną układu (-3dB).

Do obliczeń przyjąć następujące wartości pojemności C1-C3:  $C1 = 100nF$ ,  $C2 = 100nF$ ,  $C3 = 100\mu F$ .

Ze względu na to, że częstotliwość górna wzmacniacza objętego lokalnym sprzężeniem zwrotnym (brak pojemności C3) jest dużo większa od maksymalnych częstotliwości generatorów znajdujących się na stanowiskach pomiarowych w układzie wzmacniacza zastosowano dodatkową pojemność Cd. Jej zadaniem jest ograniczenie pasma wzmacniacza. Zabieg taki jest powszechnie nazywany kompensacją częstotliwościową pasma wzmacniacza tzw. biegunem dominującym. Dlatego też przy obliczaniu częstotliwości górnej układu należy wyznaczyć pojemność dodatkową Cd, którą trzeba dodać do pojemności złącza baza- kolektor  $c_{b'c}$  tranzystora (patrz Dodatek D) ( $c_{b'c} + Cd$ ) aby uzyskać zadaną częstotliwość górną wzmacniacza.

#### Po zaprojektowaniu wzmacniacza należy:

- nanieść wszystkie wartości elementów na schemat znajdujący się w Dodatku A
- obliczyć parametry statyczne i dynamiczne układu oraz porównać ich wartości z zadanymi. Wartości parametrów statycznych i dynamicznych nanieść na schemat wzmacniacza znajdujący się w Dodatku A oraz zamieścić w tabeli znajdującej się w Dodatku B.

Parametry statyczne:

- napięcie baza – emiter w punkcie pracy  $U_{beq}$ ,
- napięcie kolektor - emiter w punkcie pracy  $U_{ceq}$ ,
- prąd bazy  $I_{bq}$
- prąd kolektora  $I_{cq}$ ,

Parametry dynamiczne:

- wzmocnienie  $K_U$ ,
- rezystancję wejściową układu  $r_{we}$ ,
- rezystancję wyjściową układu  $r_{wy}$ ,
- maksymalną nieznieskształconą amplitudę wyjściową wzmacniacza  $U_{wymax}$ ,
- częstotliwość dolną  $f_d$ ,

- częstotliwość górną  $f_g$ .

Parametry dynamiczne należy wyznaczyć dla dwóch przypadków: gdy rezystor R4 nie jest zablokowany kondensatorem C4 oraz gdy wspomniany rezystor jest zablokowany kondensatorem. W pierwszym przypadku wzmacniacz jest objęty pętlą sprzężenia zwrotnego prądowo – szeregowego.

- c) wstępnie rozplanować rozmieszczenie elementów wzmacniacza na płytce uniwersalnej, której rysunek zamieszczono w Dodatku E do ćwiczenia.

***Okazanie wyników wspomnianych obliczeń oraz rysunku płytki z rozmieszczeniem elementów będzie warunkiem dopuszczenia grupy laboratoryjnej do wykonywania ćwiczenia!***

## 2. Montaż układu pomiarowego

W Dodatku E znajduje się rysunek płytki drukowanej wzmacniacza tranzystorowego. Przed przystąpieniem do pomiarów należy zmontować układ wzmacniacza. ***Uwaga – w pierwszej wersji wzmacniacz będzie objęty pętlą sprzężenia zwrotnego (prądowo – szeregowego) realizowanego przez rezystor R4, dlatego też na początku nie montujemy kondensatora C3.*** Po zmontowaniu układu należy dolutować do płytki przewody zasilające, zwracając uwagę na biegunowość napięcia zasilającego. Następnie dolutować do wejścia wzmacniacza przewód koncentryczny zakończony jednostronnie wtykiem typu BNC. Wyjście układu poprzez sondę należy połączyć z jednym z wejść oscyloskopu. W celu kontroli napięcia sterującego układ drugie wejście oscyloskopu należy podłączyć z wejściem wzmacniacza.

## 3. Program ćwiczenia

***Zmierzone podczas wykonywania ćwiczenia wartości należy umieścić:***

- ***na schemacie znajdującym się w Dodatku A do opisu ćwiczenia,***
- ***w Tabeli 1 znajdującej się w Dodatku B do opisu ćwiczenia.***

***Schemat i tabelę należy dołączyć do sprawozdania.***

### 3.1. Pomiary statyczne układu. Punkt pracy tranzystora

**3.1.1.** Przed zmontowaniem wzmacniacza zmierzyć wartości rezystancji stosowanych we wzmacniaczu.

**3.1.2.** Po zmontowaniu i uruchomieniu wzmacniacza, przed podaniem sygnału wejściowego, należy zmierzyć punkt pracy tranzystora:

- napięcie  $U_{ceq}$ ,
- napięcie  $U_{beq}$ ,
- prąd kolektora  $I_{cq}$  (mierząc spadek napięcia na rezystorze kolektorowym i korzystając z prawa Ohma).

**3.1.2.** Oszacować wartość wzmocnienia prądowego  $\beta_0$  ( $h_{21}$ ,  $h_{FE}$ ) tranzystora. W tym celu należy zmierzyć spadki napięć na rezystorach bazowych, a następnie oszacować, korzystając z

I Prawa Kirchhoffa , prąd bazy tranzystora  $I_{bq}$ . Mając oszacowaną wartość prądu bazy oraz znając wartość prądu kolektora obliczyć wartość współczynnika zwarciovego wzmocnienia prądowego  $\beta = \beta_0$  tranzystora  $\beta_0 = \frac{I_{cq}}{I_{bq}}$ .

### 3.2. Pomiary parametrów dynamicznych wzmacniacza objętego pętlą sprzężenia zwrotnego. Parametry robocze układu

Przed podłączenie generatora do układu ustawić jego pokrętkę regulacji amplitudy na wartość minimalną. Aby pomiary były obciążone niewielkim błędem, wynikającym jedynie z zastosowanej metody pomiarowej, amplituda sygnału sterującego powinna być dobrana tak aby napięcie wyjściowe wzmacniacza było nieznieskształcone.

3.2.1. Zmierzyć wzmocnienie napięciowe wzmacniacza  $K_U = \frac{U_{wy}}{U_{we}}$ .

3.2.2. Dla zakresu średnich częstotliwości (w praktyce kilka kHz) zmierzyć wartość maksymalnej nieznieskształconej amplitudy napięcia na obciążeniu układu.

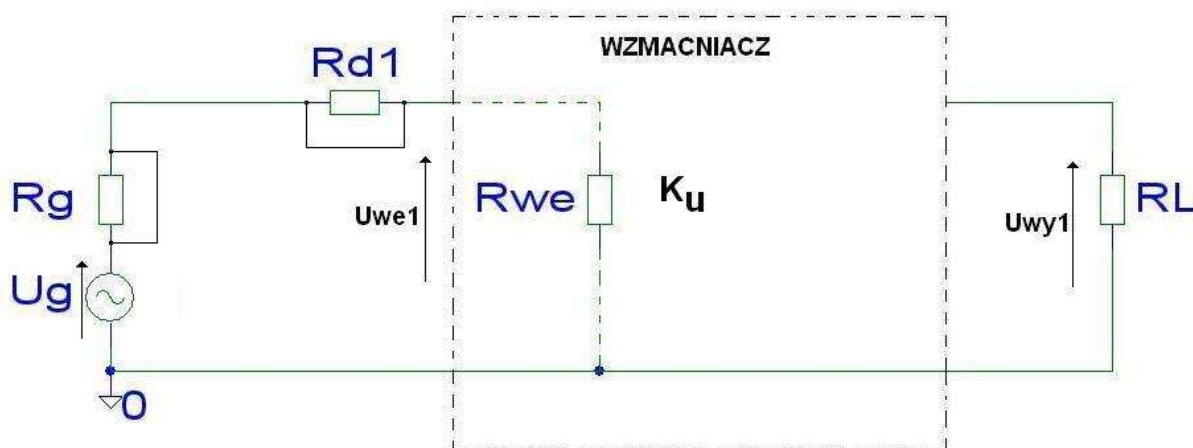
3.2.2. Zmierzyć częstotliwości graniczne (-3dB): dolną  $f_d$  i górną  $f_g$  wzmacniacza.

3.2.3. Stosując dodatkowy rezystor  $R_{d1}$  symulujący rezystancję generatora (przy czym wartość tej rezystancji powinna być dużo większa od rzeczywistej rezystancji wyjściowej generatora, w praktyce kilka kiloomów) zmierzyć wzmocnienie napięciowe skuteczne  $K_{sk}$  wzmacniacza.

3.2.4. Korzystając z dodatkowych rezystorów  $R_{d1}$  i  $R_{d2}$  oraz wykonując dodatkowe pomiary napięcie należy oszacować wartość rezystancji wejściowej i wyjściowej wzmacniacza.

Pomiar **rezystancji wejściowej** wykonujemy w następujący sposób:

- zwieramy rezystor  $R_{d1}$  oraz rezystancję generatora  $R_g$ , podajemy na wejście wzmacniacza sygnał z generatora o częstotliwości 1 kHz i amplitudzie nie powodującej zniekształceń obserwowanego na oscyloskopie napięcia na wyjściu wzmacniacza (rys.2).

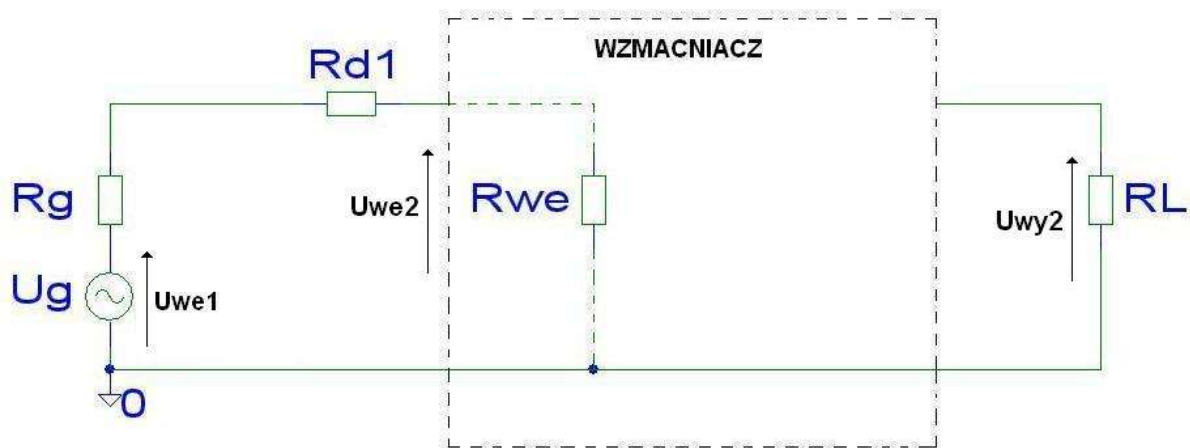


Rys. 2. Schemat układ do pomiaru rezystancji wejściowej wzmacniacza. Wyznaczanie siły elektromotorycznej generatora

Następnie mierzymy wartość napięcia na wyjściu wzmacniacza  $U_{wy1}$ . Napięcie wejściowe wzmacniacza, równe w tym przypadku sile elektromotorycznej generatora wyznaczamy z zależności

$$U_{we1} = U_g = \frac{U_{wy1}}{K_U}.$$

- rozwieramy rezystancje  $R_{d1}$  i  $R_g$  i nie zmieniając amplitudy generatora ponownie mierzymy wartość napięcia na wyjściu wzmacniacza  $U_{wy2}$  (rys.3).



Rys. 3. Schemat układ do pomiaru rezystancji wejściowej wzmacniacza. Wyznaczanie wartości napięcia wejściowego

Napięcie wejściowe w tym przypadku wyznaczamy z zależności:

$$U_{we2} = \frac{U_{we1}}{K_U}.$$

Teraz korzystając z równania opisującego dzielnik napięcia:

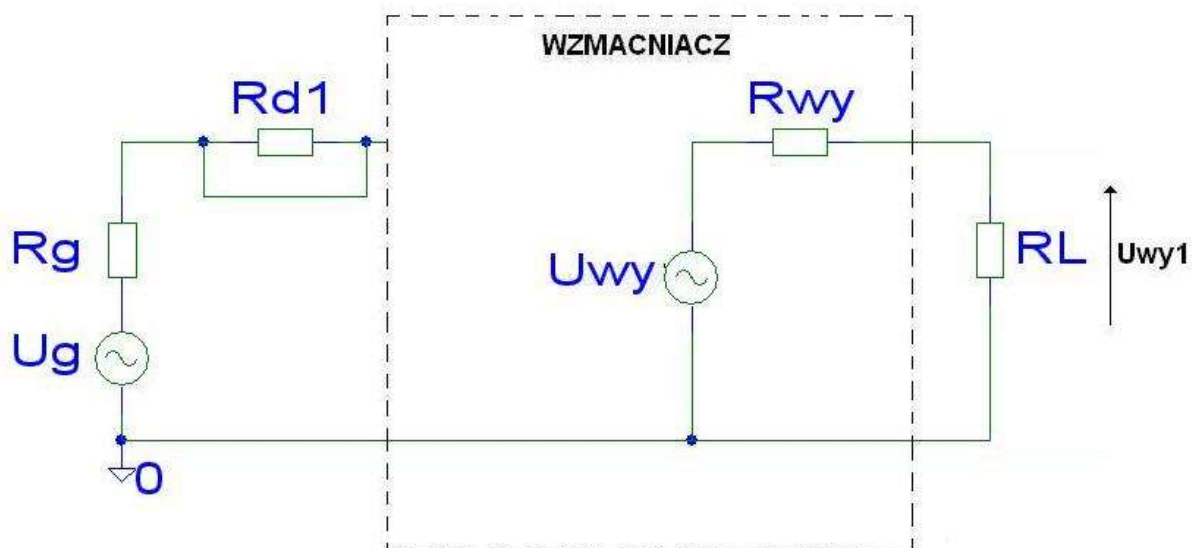
$$U_{we2} = U_{we1} \frac{R_{we}}{R_{we} + R_g + R_{d1}},$$

po pewnych przekształceniach, można wyznaczyć wartość rezystancji wejściowej wzmacniacza:

$$R_{we} = \frac{U_{we2}(R_g + R_{d1})}{U_{we1} - U_{we2}} = \frac{\frac{U_{wy2}}{K_U}(R_g + R_{d1})}{\frac{U_{wy1}}{K_U} - \frac{U_{wy2}}{K_U}} = \frac{U_{wy2}(R_g + R_{d1})}{U_{wy1} - U_{wy2}}.$$

**Rezystancję wyjściową** wyznaczamy traktując wyjście wzmacniacza jako źródło napięcia  $U_{wy}$  o rezystancji wewnętrznej  $R_{wy}$  równej rezystancji wyjściowej wzmacniacza. Wykonujemy następujące pomiary:

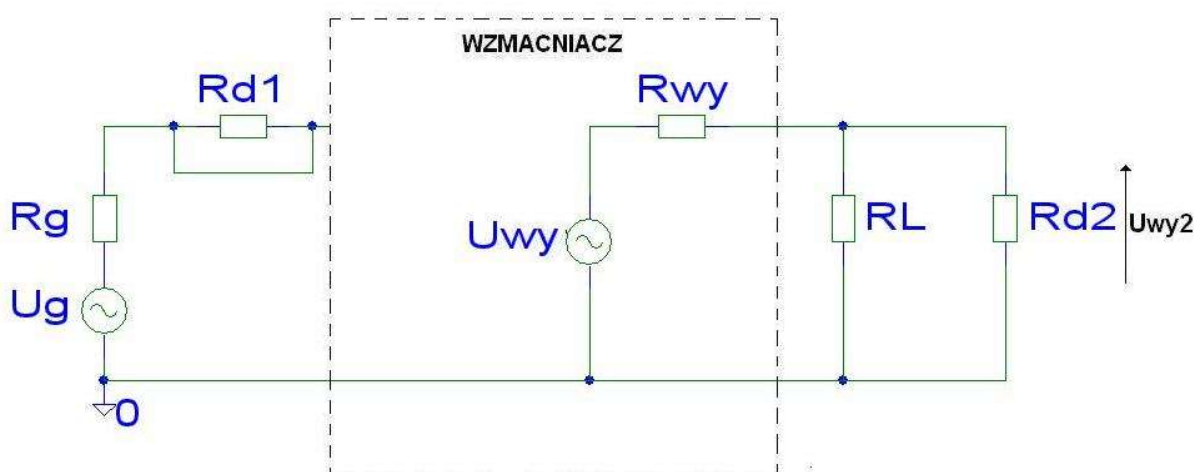
- zwieramy rezystor  $R_{d1}$ , podajemy na wejście wzmacniacza sygnał z generatora o częstotliwości 1 kHz i amplitudzie nie powodującej zniekształceń obserwowanego na oscyloskopie napięcia na wyjściu wzmacniacza (rys.4).



Rys. 4. Wyznaczanie rezystancji wyjściowej wzmacniacza. Pomiar napięcia wyjściowego bez rezystancji  $R_{d2}$

Następnie mierzymy wartość napięcia wyjściowego  $U_{wy1}$ .

- do rezystancji obciążenia dołączamy rezystor  $R_{d2}$ . Nie zmieniając amplitudy generatora wejściowego mierzymy wartość napięcia na wyjściu wzmacniacza  $U_{wy2}$  (rys.5).



Rys. 5. Wyznaczanie rezystancji wyjściowej wzmacniacza. Pomiar napięcia wyjściowego z rezystancją dodatkową  $R_{d2}$

Rezystancję wyjściową wyznaczamy korzystając ponownie z zależności opisującej dzielnik napięcia. Nie znamy dwóch parametrów dzielnika ( $U_{wy}$  i  $R_{wy}$ ) więc musimy rozwiązać następujący układ równań liniowych:

$$\begin{cases} U_{wy1} = U_{wy} \frac{R_L}{R_L + R_{wy}} \\ U_{wy2} = U_{wy} \frac{R_{L1}}{R_{L1} + R_{wy}} \end{cases},$$

gdzie  $R_{L1} = \frac{R_L R_{d2}}{R_L + R_{d2}}$ .

Po rozwiązaniu układu otrzymujemy:

$$R_{wy} = \frac{R_L R_{L1} (U_{wy1} - U_{wy2})}{U_{wy2} R_L - U_{wy1} R_{L1}}.$$

Aby pomiary rezystancji: wejściowej i wyjściowej były dokładne należy dobierając rezystory dodatkowe pamiętać, że:

- wartość sumy rezystorów  $R_{d1}$  i  $R_g$  powinna być zbliżona ( $\pm 50\%$ ) do wartości wyznaczonej teoretycznie  $R_{we}$
- wartość rezystancji  $R_{d2}$  nie powinna się zbytnio różnić (także  $\pm 50\%$ ) od wartości rezystancji  $R_L$ .

### 3.3. Pomiary dynamiczne parametrów wzmacniacza bez sprzężenia zwrotnego. Parametry robocze układu

Zamontować w badanym układzie wzmacniacza kondensator C3. Ponownie wykonać wszystkie pomiary opisane w punkcie 3.2.

### 4. Uwagi odnośnie sprawozdania.

Podczas realizacji ćwiczenia wykonano pomiary statyczne wzmacniacza oraz dwie serie pomiarów parametrów dynamicznych układu (wzmacniacz z pętlą i bez pętli sprzężenia zwrotnego). Wszystkie zmierzone parametry należy porównać z parametrami teoretycznymi. We wnioskach należy przeprowadzić dyskusję różnic pomiędzy uzyskanymi wynikami rzeczywistymi i obliczonymi, podejmując próbę wyjaśnienia powodów powstawania tych różnic.

### 5. Poprzedzające ćwiczenie zagadnienia do wstępnego przygotowania

- układy zasilania tranzystora bipolarnego.
- wpływ temperatury oraz rozrzutu produkcyjnego na parametry tranzystora bipolarnego,

- charakterystyki tranzystora bipolarnego, punkt pracy tranzystora, prosta pracy: statyczna i dynamiczna. Trajektoria punktu pracy tranzystora przy obciążeniu o charakterze reaktancyjnym, maksymalna amplituda napięcia wyjściowego wzmacniacza tranzystorowego, maksymalna moc kolektora.
- modelowanie tranzystora bipolarnego dla różnych zakresów częstotliwości, tworzenie schematów do analizy stało- i zmiennoprądowej wzmacniacza, wyznaczanie parametrów roboczych wzmacniacza.
- ujemne sprzężenie zwrotne,
- twierdzenia: Kirchhoffa, Millera.
- pomiar rezystancji wejściowej i wyjściowej czwórniką poprzez zastosowanie dodatkowych, nieregulowanych, rezystancji oraz wykonanie dodatkowych pomiarów napięcia,

## **6. Literatura**

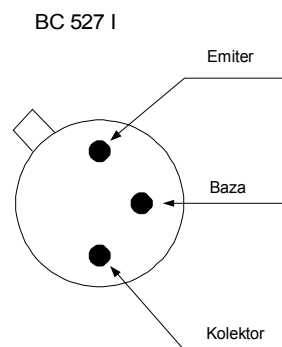
[1] Wykład z Układów Elektronicznych 1

[2] Laboratorium Układów Elektronicznych cz.2, pod redakcją A. Prałata, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001, s. 5 - 26.

[3] Nosal Z. Baranowski J., Układy elektroniczne, cz.1, Układy analogowe liniowe, Warszawa WNT, 1998, s. 77 – 89.

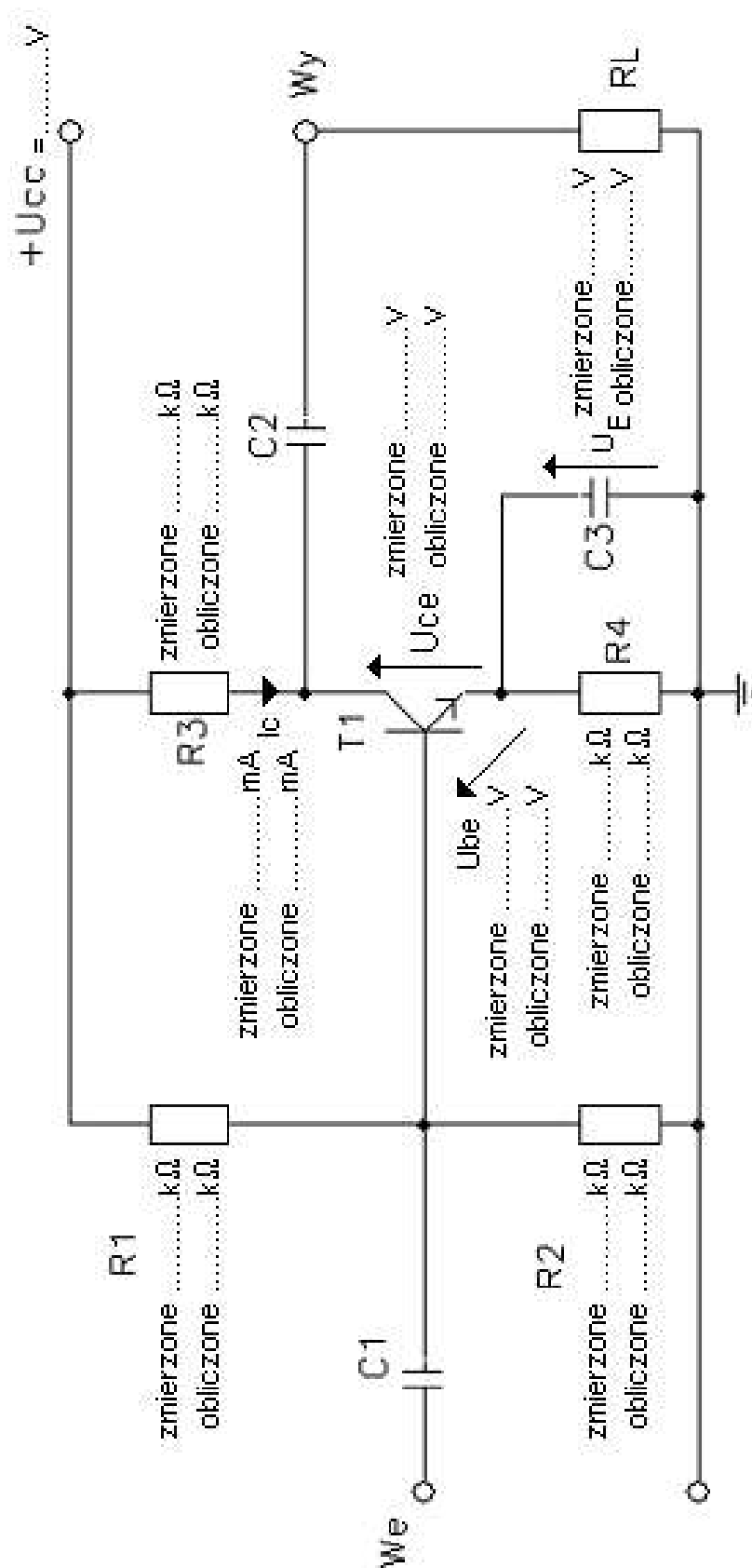


## 7. Obudowa tranzystora BC 528



Widok od spodu

Rys. 6. Wyprowadzenia końcówek tranzystora BC 527



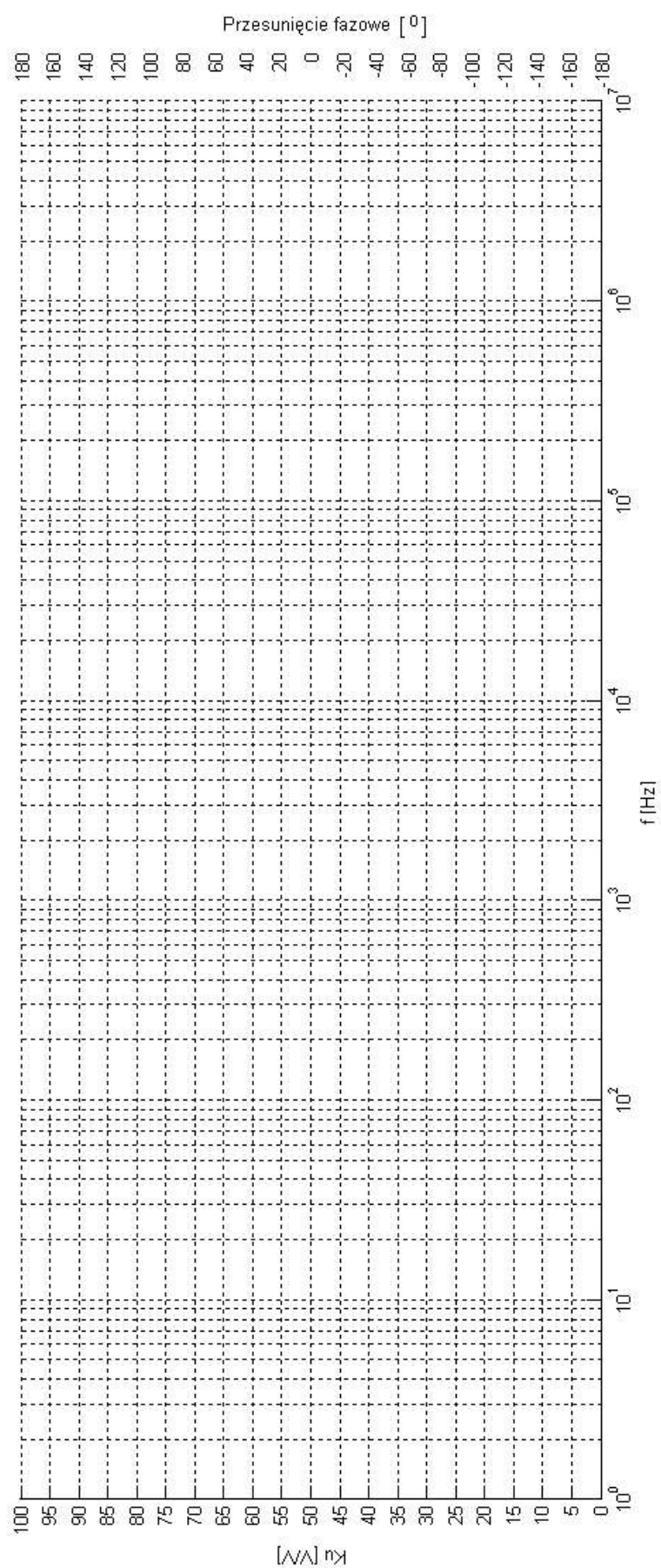
Rys..... Schemat wzmacniacza z naniesionymi wartościami napięć i prądów stałych

## Dodatek B

Tabela 1. Porównanie parametrów wzmacniacza: teoretycznych i zmierzonych.

Parametr		Wartość obliczona	Wartość zmierzona
U <sub>ce</sub> [V]			
U <sub>be</sub> [V]			
I <sub>c</sub> [mA]			
U <sub>R2</sub> [V]			
K <sub>u</sub> [V/V]	bez sprzężenia		
	ze sprzężeniem		
K <sub>usk</sub> [V/V]	bez sprzężenia		
	ze sprzężeniem		
R <sub>we</sub> [kΩ]	bez sprzężenia		
	ze sprzężeniem		
R <sub>wy</sub> [kΩ]	bez sprzężenia		
	ze sprzężeniem		
f <sub>d</sub> [Hz]	bez sprzężenia		
	ze sprzężeniem		
f <sub>g</sub> [kHz]	bez sprzężenia		
	ze sprzężeniem		
U <sub>wymax</sub> [V]	bez sprzężenia		
	ze sprzężeniem		

## Dodatek C



Rys..... Charakterystyka amplitudowa i fazowa układu

## Dodatek D

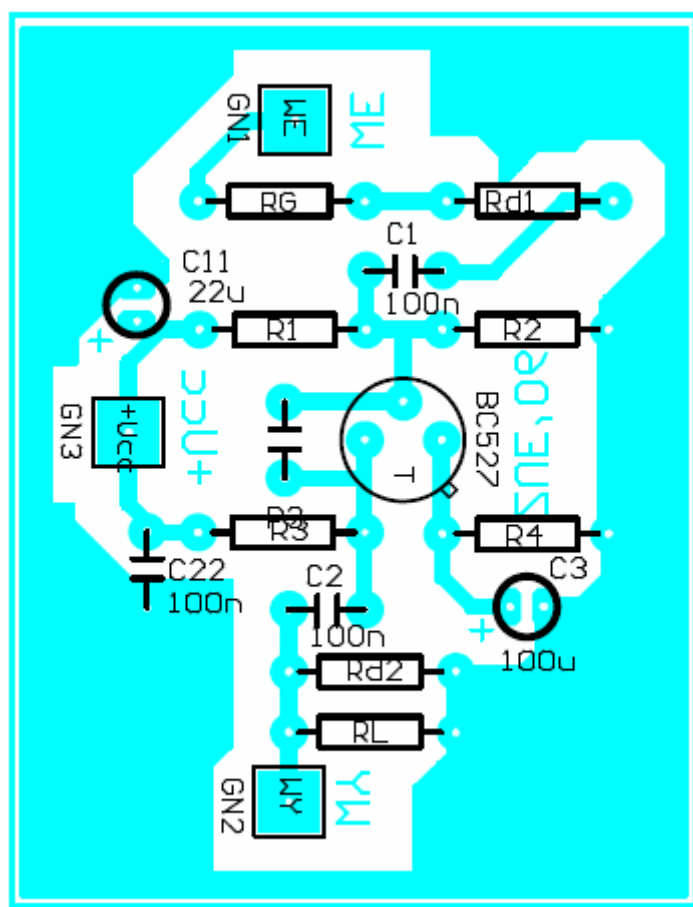
### Dane tranzystora BC 527

BC 527 I  $U_{CE} = 5 \text{ V}$ ,  $t = 27 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $VAF = 116$ ,  $B_F = 375,5$

Lp.	$I_B$ [ $\mu\text{A}$ ]	$I_C$ [mA]	$\beta_0$	$g_m$ [mS]	$r_{b'e}$ [k $\Omega$ ]	$r_{ce}$ [k $\Omega$ ]	$C_{b'e}$ [pF]	$C_{b'c}$ [pF]	$\beta$	$f_T$ [MHz]
1	0.5	0.0547	109	2.11	61.4	2210	19.9	2.70	130	14.9
2	1.0	0.124	124	4.80	30.4	973	21.5	2.71	146	31.6
3	1.5	0.20	133	7.71	20.2	605	23.0	2.71	155	47.8
4	2.0	0.279	140	10.6	15.1	432	24.5	2.71	162	63.1
5	2.5	0.362	145	14.0	12.0	334	26.0	2.71	168	77.4
6	3.0	0.447	149	17.3	9.97	270	27.6	2.71	172	90.7
7	3.5	0.534	152	20.6	8.53	226	29.2	2.71	176	103
8	4.0	0.622	156	24.1	7.45	194	30.8	2.72	179	114
9	4.5	0.713	158	27.5	6.61	169	32.4	2.72	182	125
10	5.0	0.804	161	31.1	5.94	150	34.1	2.72	185	135
11	5.5	0.897	163	34.7	5.39	134	35.7	2.72	187	144
12	6.0	0.091	165	38.3	4.93	122	37.4	2.72	189	152
13	6.5	1.09	167	42.0	4.55	111	39.1	2.72	191	160
14	7.0	1.18	169	45.7	4.22	102	40.8	2.72	193	167
15	7.5	1.28	171	49.4	3.93	94.3	42.5	2.72	194	174
16	8.0	1.38	172	53.2	3.68	87.6	44.2	2.72	196	180
17	8.5	1.47	174	57.0	3.46	81.8	46.0	2.72	197	186
18	9.0	1.57	175	60.8	3.27	76.6	47.7	2.72	199	192
19	9.5	1.67	176	64.7	3.09	72.1	49.5	2.72	200	197
20	10	1.77	177	68.6	2.94	68.0	51.3	2.72	201	202
21	12	2.18	182	84.3	2.44	55.3	58.4	2.72	206	219
22	14	2.60	185	100	2.09	46.5	65.7	2.72	209	233
23	16	3.02	189	117	1.82	40.0	73.1	2.72	213	245
24	18	3.45	191	133	1.62	35.0	80.6	2.72	215	254
25	20	3.88	194	150	1.45	31.1	88.2	2.72	218	262
26	25	4.98	199	192	1.16	24.2	108	2.73	223	278
27	30	6.11	204	236	0.963	19.8	127	2.72	227	289
28	35	7.27	207	280	0.823	16.6	147	2.73	230	297
39	40	8.41	210	324	0.719	14.3	167	2.73	233	304
30	45	9.58	213	370	0.638	12.6	188	2.73	236	309
31	50	10.8	215	415	0.573	11.2	208	2.73	238	313
32	60	13.2	219	507	0.477	9.16	250	2.73	242	319
33	70	15.6	223	601	0.408	7.73	292	2.73	245	324
34	80	18.1	226	696	0.356	6.67	335	2.74	248	328
35	100	23.1	231	887	0.284	5.23	422	2.74	252	333
36	150	35.8	239	1370	0.188	3.36	642	2.74	259	339

Rys. .... Charakterystyka amplitudowa i fazowa układu

## Dodatek E



Rys. 7. Widok płytki drukowanej wzmacniacza tranzystorowego