

229879
numer albumu

Michał Gebel
imię i nazwisko

229908
numer albumu

Antoni Karwowski
imię i nazwisko

kierunek Informatyka Stosowana czwartek
semestr III
rok akademicki 2020/21

dzień tygodnia
14:00-15:30
godziny zajęć
4
numer zespołu

Laboratorium elektroniki

Ćwiczenie E-08 Wzmacniacze Operacyjne

17.12.2020r.

data wykonania pomiarów

17.12.2020r.

data oddania raportu

ocena _____

1. Cel ćwiczenia

1.1 Sformułowanie celu ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie właściwości wzmacniaczy operacyjnych oraz możliwości wykorzystania ich do realizacji bloków funkcjonalnych poprzez dobór odpowiednich sprzężeń zwrotnych.

1.2 Wstęp teoretyczny

1.2.0 Oznaczenia

U_{wy} [V] – napięcie wejściowe

U_{we} [V] – napięcie wyjściowe

k_u [1] – współczynnik wzmocnienia

k_u^t [1] – teoretyczny współczynnik wzmocnienia

k_u^A [dB] – współczynnik wzmocnienia amplitudowego

k_u^{At} [dB] – teoretyczny współczynnik wzmocnienia amplitudowego

f [Hz] – częstotliwość

R_{we} [Ω] – rezystancja (opór) wejściowa

R_{wy} [Ω] – rezystancja (opór) wyjściowa

ΔR_{we} [Ω] – niepewność rezystancji wejściowej

ΔR_{wy} [Ω] – niepewność rezystancji wyjściowej

1.2.1 charakterystyka przejściowa wzmacniacza operacyjnego:

$$U_{wy} = f(U_{we}) \quad (0)$$

1.2.2 współczynnik wzmocnienia (rzeczywisty i teoretyczny)

$$k_u^t = \frac{-R_2}{R_1} \quad k_u = \frac{U_{we}}{U_{wy}} \quad (1a, 1b)$$

1.2.3 współczynnik wzmocnienia Amplitudowego (rzeczywisty i teoretyczny)

$$k_u^{At} = 20 \log_{10} \left| \frac{R_2}{R_1} \right| \quad k_u^A = 20 \log_{10} \left| \frac{U_{we}}{U_{wy}} \right| \quad (2a, 2b)$$

1.2.4 Rezystancja wejściowa i wyjściowa dla wzmacniacza nieodwracającego

$$R_{WE} = \frac{R_{S3}}{\frac{U_{WY}}{U_{WY R3}} - 1}; \quad R_{WY} = R_L \left(\frac{U_{WY}}{U_{WY RL}} - 1 \right) \quad (3a, 3b)$$

1.2.3 Rezystancja wejściowa i wyjściowa dla wzmacniacza odwracającego

$$R_{WE} = \frac{R_{Si}}{\frac{U_{WY}}{U_{WY RSi}} - 1} = R_{WE}(x, y) = \frac{R_{Si}}{\frac{x}{y} - 1}$$

$$R_{WY} = R_L \cdot \left(\frac{U_{WY}}{U_{WY RL}} - 1 \right) = R_{WY}(x, z) = R_L \cdot \left(\frac{x}{z} - 1 \right)$$

gdzie:

(4a, 4b)

$$x = U_{WY}; \quad y = U_{WY RSi}; \quad z = U_{WY RL}$$

1.2.4 niepewność Rezystancji wejściowej i wyjściowej

$$u_c(R_{WY}) = R_L \cdot \left(\frac{1}{z} \right) \cdot \sqrt{u^2(x) + \left(\frac{x}{z} \right)^2 \cdot u^2(z)}$$

$$u_c(R_{WE}) = \frac{R_{Si}}{\left(\frac{x}{y} - 1 \right)^2} \cdot \left(\frac{1}{y} \right) \cdot \sqrt{u^2(x) + \left(\frac{x}{y} \right)^2 \cdot u^2(y)}$$

(5a, 5b)

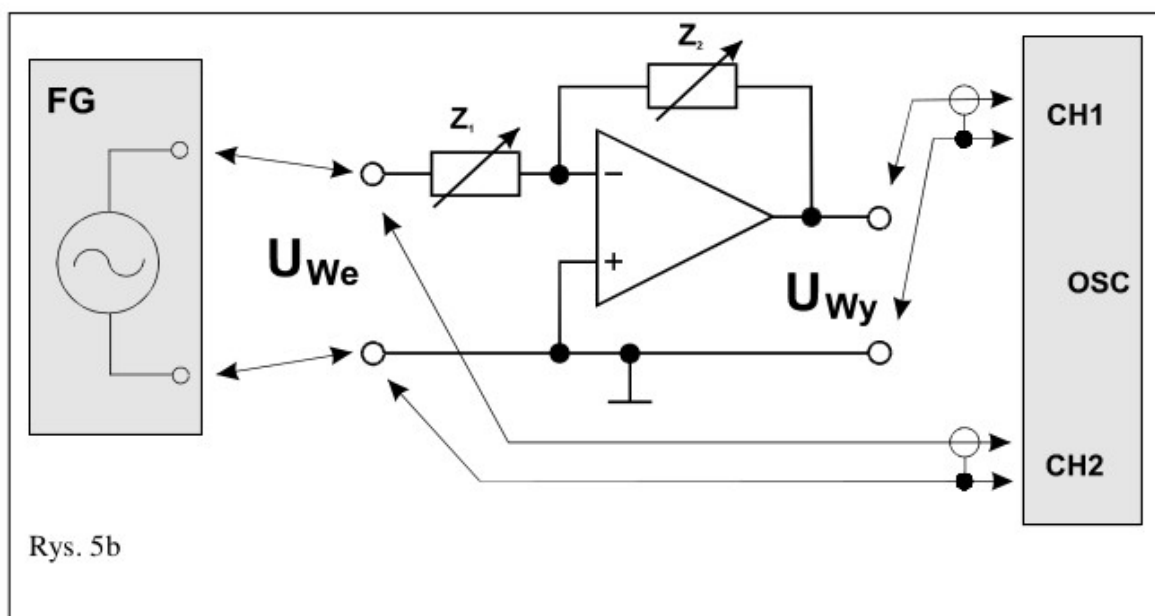
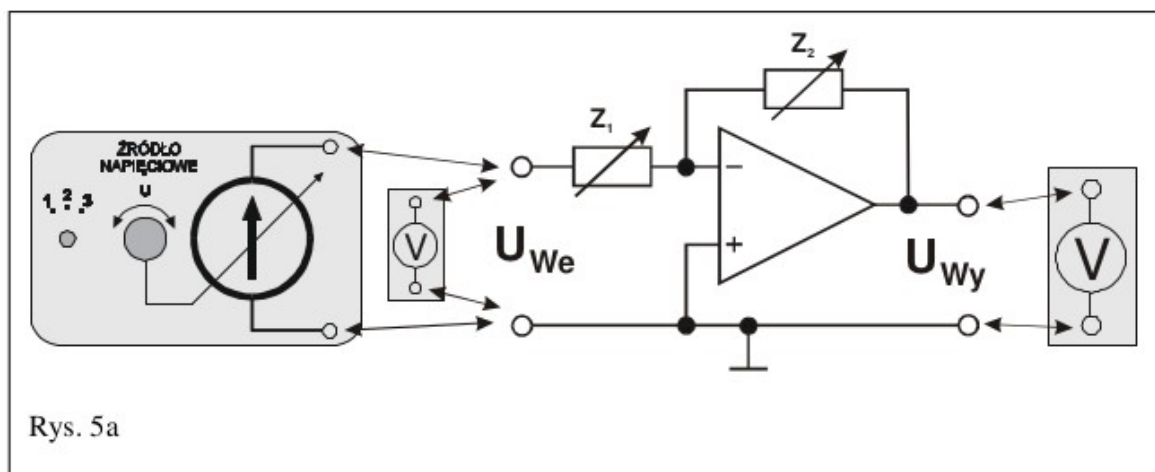
2. Schematy układów pomiarowych

FG – generator

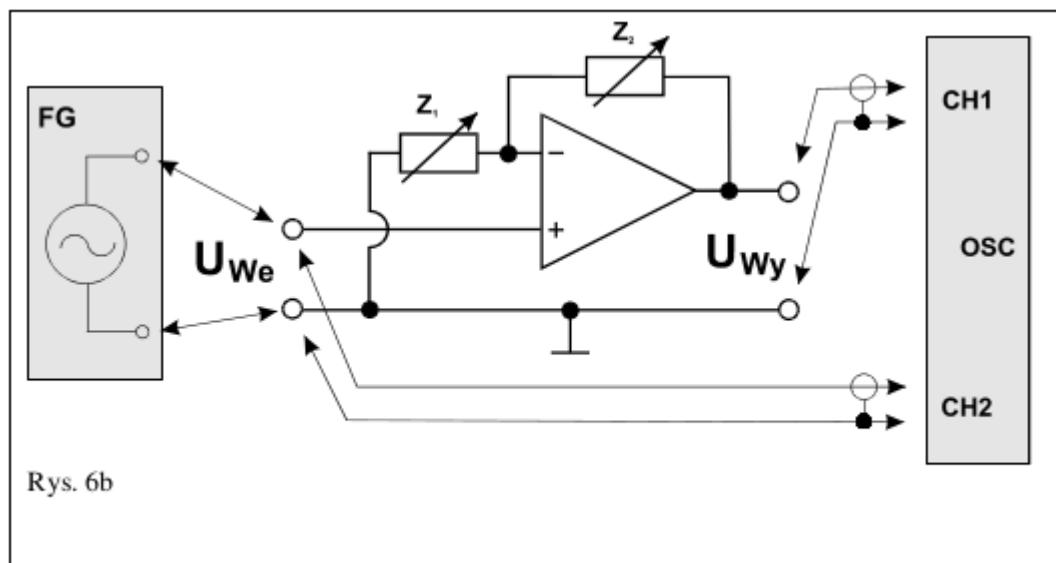
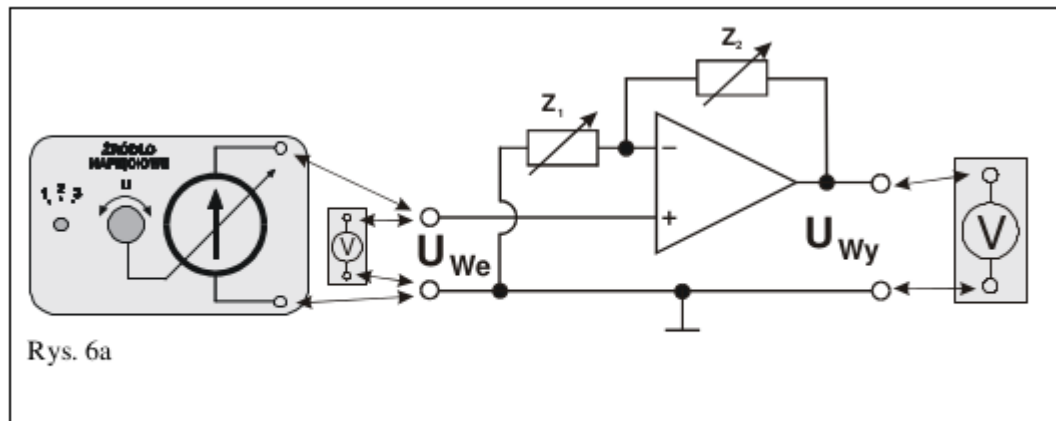
OSC – oscyloskop

CH1 i CH2 – wejścia oscyloskopu

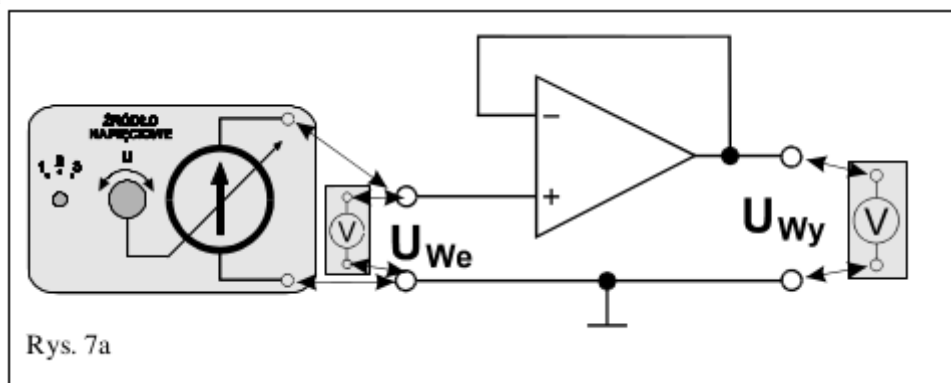
V – woltomierz



Rys. 1. schemat połączeń dla wzmacniacza operacyjnego w układzie odwracającym – wersja podstawowa



Rys. 2. schemat połączeń dla wzmacniacza operacyjnego w układzie nieodwracającym – wersja podstawowa



Rys. 3. schemat połączeń dla wzmacniacza operacyjnego w układzie nieodwracającym – wersja rozszerzona – wtórnik

3. Wykaz aparatury

Aparatura użyta dla części wzmacniacz w układzie odwracającym oraz wzmacniacz w układzie nieodwracającym

- 1). Moduł doświadczalny W-03
- 2). Zespół Źródeł Sterujących, nr inw. ZŻS-06
- 3). Multimetr UT-804, nr inw. I3/RPO/010/T8/50/1 - do pomiaru UWE, zakres 40 V DC
- 4). Multimetr Protek 506, nr inw. WD043.01-005-203 - do pomiaru UWY, zakres 40 V DC
- 5). Generator funkcyjny DF1641B, nr inw. WD045.01-007-203
- 6). Oscyloskop cyfrowy SIGLENT SDS 1052DL, nr inw. I3/RPO/010/T8/68/3
- 7). Zasilacz Siglent SPD3303D, nr inw. I3/RPO/010/T8/48/2

Aparatura użyta dla części wzmacniacz w układzie nieodwracającym - wtórnik

- 1). Moduł doświadczalny W-03
- 2). Zespół Źródeł Sterujących, nr inw. ZŻS-06
- 3). Multimetr Protek 506, nr inw. WD043.01-005-203 - do pomiaru UWE, zakres 40 V DC
- 4). Multimetr Kemot KT890, nr inw. I3/2.03/2017-K/4 - do pomiaru UWY, zakres 20 V DC
- 5). Generator funkcyjny DF1641B, nr inw. WD045.01-007-203
- 6). Oscyloskop cyfrowy SIGLENT SDS 1052DL, nr inw. I3/RPO/010/T8/68/3
- 7). Zasilacz Siglent SPD3303D, nr inw. WD051.02-004-203

4. Stabelaryzowane wyniki pomiarów

model multimetru	zakres	dgts	niepewność graniczna
UT-804	40 V	0,001 V	$\Delta U = \pm(0,05\% \text{rdg} + 5 \text{ dgts})$
Protek 506	40 V	0,01 V	$\Delta U = \pm(0,5\% \text{rdg} + 2 \text{ dgts})$

Tabela 0 Informacje służące do wyliczania niepewności pomiarowych na podstawie dokumentacji użytych mierników

4.1 Wyniki pomiarów dla wzmacniacza operacyjnego w układzie odwracającym – wersja podstawowa

Z1	Z2	Napięcie wejściowe		Napięcie wyjściowe	
[kΩ]	[kΩ]	UWE [V]	ΔU_{WE} [V]	UWY [V]	ΔU_{WY} [V]
10	20	-12,02	0,01	14,07	0,09
10	20	-11,04	0,01	14,07	0,09
10	20	-10,05	0,01	14,07	0,09
10	20	-9,02	0,01	14,07	0,09
10	20	-8,03	0,01	14,07	0,09
10	20	-7,13	0,01	13,97	0,09
10	20	-6,96	0,01	13,63	0,09
10	20	-6,63	0,01	12,99	0,08
10	20	-6,01	0,01	11,78	0,08
10	20	-5,03	0,01	9,87	0,07
10	20	-4,00	0,01	7,84	0,06
10	20	3,00	0,01	5,88	0,05
10	20	-1,99	0,01	3,90	0,04
10	20	-0,99	0,01	1,94	0,03
10	20	0,04	0,01	-0,07	0,02
10	20	1,06	0,01	-2,08	0,03
10	20	2,04	0,01	-4,00	0,04
10	20	3,00	0,01	-5,94	0,05
10	20	4,07	0,01	-7,97	0,06
10	20	5,01	0,01	-9,82	0,07
10	20	5,72	0,01	-11,20	0,08
10	20	6,06	0,01	-11,87	0,08
10	20	6,48	0,01	-12,69	0,08
10	20	7,06	0,01	-13,04	0,09
10	20	8,03	0,01	-13,04	0,09
10	20	10,13	0,01	-13,04	0,09
10	20	11,92	0,01	-13,04	0,09

Tabela 1a Wyniki pomiarów charakterystyki przejściowej wzmacniacza operacyjnego

RS1	RL	Napięcie wejściowe		Napięcie wyjściowe	
[kΩ]	[kΩ]	UWE [V]	ΔUWE [V]	UWY [V]	ΔUWY [V]
-	∞	-5,03	0,01	9,85	0,07
10	∞	-5,03	0,01	4,98	0,04

Tabela 1b Wyniki pomiarów rezystancji wejściowej wzmacniacza operacyjnego

RS1	RL	Napięcie wejściowe		Napięcie wyjściowe	
[kΩ]	[kΩ]	UWE [V]	ΔUWE [V]	UWY [V]	ΔUWY [V]
-	∞	-6,13	0,01	12,00	0,08
-	20	-6,13	0,01	12,00	0,08
-	10	-6,13	0,01	12,00	0,08
-	5	-6,13	0,01	12,00	0,08
-	2	-6,13	0,01	12,00	0,08

Tabela 1c Wyniki pomiarów rezystancji wyjściowej wzmacniacza operacyjnego

f	UWE	UWY
[kHz]	[V]	[V]
0,3010	0,172	1,68
105,5	0,176	0,840
171,9	0,176	0,552
222,6	0,174	0,424
281,0	0,174	0,332
325,1	0,174	0,284
427,6	0,174	0,208
499,8	0,176	0,180
527,1	0,174	0,162

Tabela 1d Wyniki pomiarów pasma przenoszenia wzmacniacza operacyjnego

Z1	Z2	UWE	UWY
[kΩ]	[kΩ]	[mV]	[mV]
5	10	124	236
10	20	124	232
15	50	130	396
25	20	148	130
25	10	224	106
15	100	224	1480
30	100	228	760

Tabela 1e Wyniki pomiarów współczynnika wzmocnienia wzmacniacza operacyjnego

4.2 Wyniki pomiarów dla wzmacniacza operacyjnego w układzie nieodwracającym – wersja podstawowa

Z1	Z2	Napięcie wejściowe		Napięcie wyjściowe	
[kΩ]	[kΩ]	UWE [V]	ΔU_{WE} [V]	UWY [V]	ΔU_{WY} [V]
10	20	-12,05	0,01	-13,05	0,09
10	20	-11,06	0,01	-13,05	0,09
10	20	-10,04	0,01	-13,05	0,09
10	20	-8,98	0,01	-13,05	0,09
10	20	-8,05	0,01	-13,05	0,09
10	20	-7,92	0,01	-13,05	0,09
10	20	-5,95	0,01	-13,05	0,09
10	20	-4,96	0,01	-13,05	0,09
10	20	-4,24	0,01	-12,51	0,08
10	20	-4,11	0,01	-12,17	0,08
10	20	-3,99	0,01	-11,81	0,08
10	20	-3,62	0,01	-10,72	0,07
10	20	-3,19	0,01	-9,43	0,07
10	20	-1,96	0,01	-5,82	0,05
10	20	-1,06	0,01	-3,14	0,04
10	20	0,01	0,01	0,17	0,02
10	20	1,02	0,01	3,02	0,04
10	20	1,98	0,01	5,87	0,05
10	20	3,01	0,01	8,91	0,06
10	20	4,02	0,01	11,90	0,08
10	20	4,16	0,01	12,31	0,08
10	20	4,33	0,01	13,56	0,09
10	20	4,58	0,01	14,09	0,09
10	20	4,81	0,01	14,09	0,09
10	20	6,70	0,01	14,10	0,09
10	20	9,11	0,01	14,10	0,09
10	20	10,06	0,01	14,10	0,09
10	20	12,02	0,01	14,10	0,09

Tabela 2a Wyniki pomiarów charakterystyki przejściowej wzmacniacza operacyjnego

RS2/RS3	RL	Napięcie wejściowe		Napięcie wyjściowe	
[kΩ]	[kΩ]	UWE [V]	ΔU_{WE} [V]	UWY [V]	ΔU_{WY} [V]
-	∞	3,03	0,01	8,99	0,07
300	∞	3,03	0,01	8,98	0,06
10000	∞	3,03	0,01	8,74	0,06

Tabela 2b Wyniki pomiarów rezystancji wejściowej wzmacniacza operacyjnego

RS2/RS3	RL	Napięcie wejściowe		Napięcie wyjściowe	
[kΩ]	[kΩ]	UWE [V]	ΔU_{WE} [V]	UWY [V]	ΔU_{WY} [V]
-	∞	4,06	0,01	12,02	0,08
-	20	4,06	0,01	12,02	0,08
-	10	4,06	0,01	12,02	0,08
-	5	4,06	0,01	12,02	0,08
-	2	4,06	0,01	12,02	0,08

Tabela 2c Wyniki pomiarów rezystancji wyjściowej wzmacniacza operacyjnego

f	UWE	UWY
[kHz]	[V]	[V]
0,2990	152	1500
117,2	152	720
176,7	148	504
245,6	148	354
297,1	150	304
364,0	150	244
466,1	150	180
496,5	150	176
576,0	150	148

Tabela 2d Wyniki pomiarów pasma przenoszenia wzmacniacza operacyjnego

Z1	Z2	UWE	UWY
[kΩ]	[kΩ]	[V]	[V]
5	10	146	408
10	20	148	408
15	50	146	600
25	20	146	252
25	10	148	200
15	100	154	1100
30	100	150	616
25	1000	148	5600

Tabela 2e Wyniki pomiarów współczynnika wzmocnienia wzmacniacza operacyjnego

4.3 Wyniki pomiarów dla wzmacniacza operacyjnego w układzie nieodwracającym – wersja rozszerzona - wtórnik

Z1	Z2	Napięcie wejściowe		Napięcie wyjściowe	
[kΩ]	[kΩ]	UWE [V]	ΔU_{WE} [V]	UWY [V]	ΔU_{WY} [V]
∞	0,0	-12,63	0,01	-12,55	0,08
∞	0,0	-10,52	0,01	-10,54	0,07
∞	0,0	-8,42	0,01	-8,44	0,06
∞	0,0	-6,37	0,01	-6,39	0,05
∞	0,0	-4,25	0,01	-4,26	0,04
∞	0,0	-2,15	0,01	-2,16	0,03
∞	0,0	-1,04	0,01	-1,04	0,03
∞	0,0	0,00	0,01	0,00	0,02
∞	0,0	1,00	0,01	1,00	0,03
∞	0,0	2,16	0,01	2,16	0,03
∞	0,0	4,22	0,01	4,23	0,04
∞	0,0	6,49	0,01	6,51	0,05
∞	0,0	10,60	0,01	10,63	0,07
∞	0,0	12,76	0,01	12,79	0,08

Tabela 3a Wyniki pomiarów charakterystyki przejściowej wzmacniacza operacyjnego

RS2/RS3	RL	Napięcie wejściowe		Napięcie wyjściowe	
[kΩ]	[kΩ]	UWE [V]	ΔU_{WE} [V]	UWY [V]	ΔU_{WY} [V]
-	∞	10,57	0,01	10,60	0,07
300	∞	10,57	0,01	10,60	0,07
10000	∞	10,57	0,01	10,58	0,07

Tabela 3b Wyniki pomiarów rezystancji wejściowej wzmacniacza operacyjnego

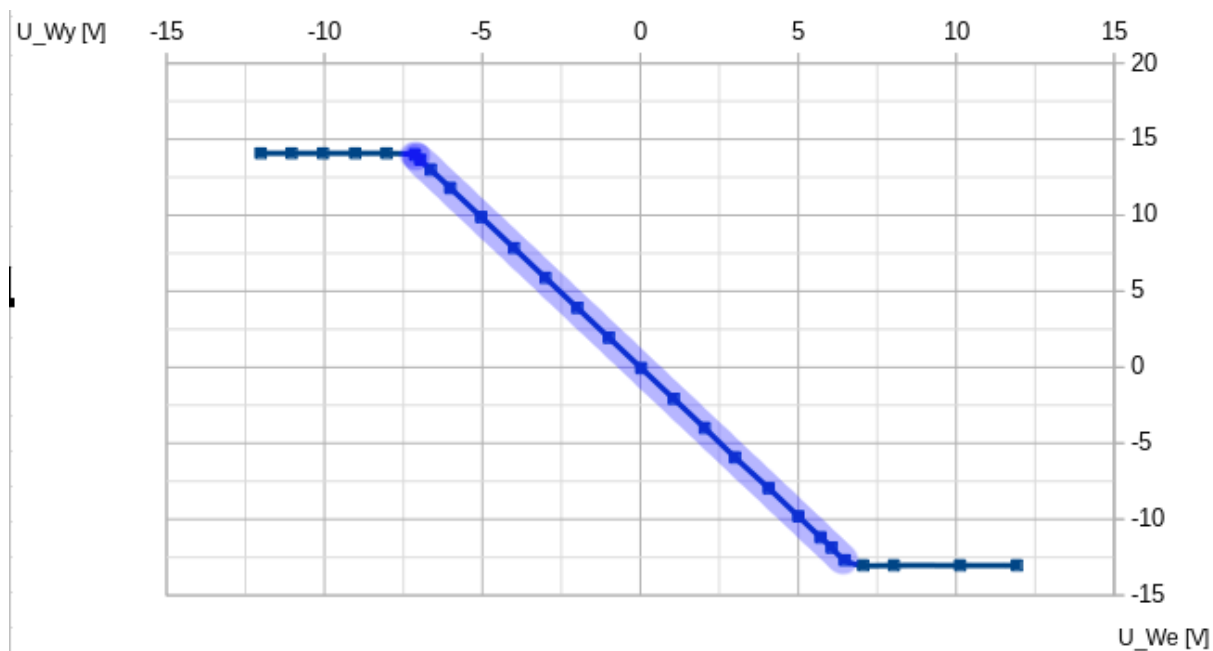
RS2/RS3	RL	Napięcie wejściowe		Napięcie wyjściowe	
[kΩ]	[kΩ]	UWE [V]	ΔU_{WE} [V]	UWY [V]	ΔU_{WY} [V]
-	∞	10,57	0,01	10,60	0,07
-	20	10,57	0,01	10,60	0,07
-	10	10,57	0,01	10,60	0,07
-	5	10,57	0,01	10,60	0,07
-	2	10,57	0,01	10,60	0,07

Tabela 3c Wyniki pomiarów rezystancji wyjściowej wzmacniacza operacyjnego

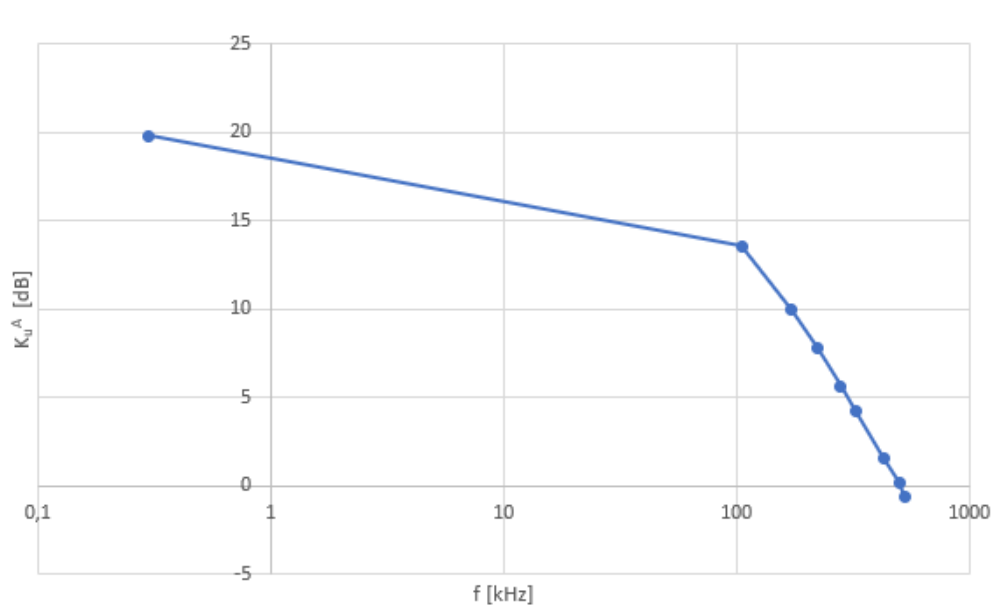
f	UWE	UWY
[kHz]	[mV]	[mV]
0,2963	18,8	20,0
2,951	18,8	20,4
30,12	18,4	20,0
310,0	18,8	20,4
634,1	18,8	20,4
814,2	18,8	19,6
910,0	18,4	19,2
999,3	18,4	17,6
1101	18,4	16,8
1201	18,0	15,6
1300	18,4	14,8
1401	18,0	13,6
1451	18,4	13,2
1508	18,4	12,8

Tabela 3d Wyniki pomiarów pasma przenoszenia wzmacniacza operacyjnego

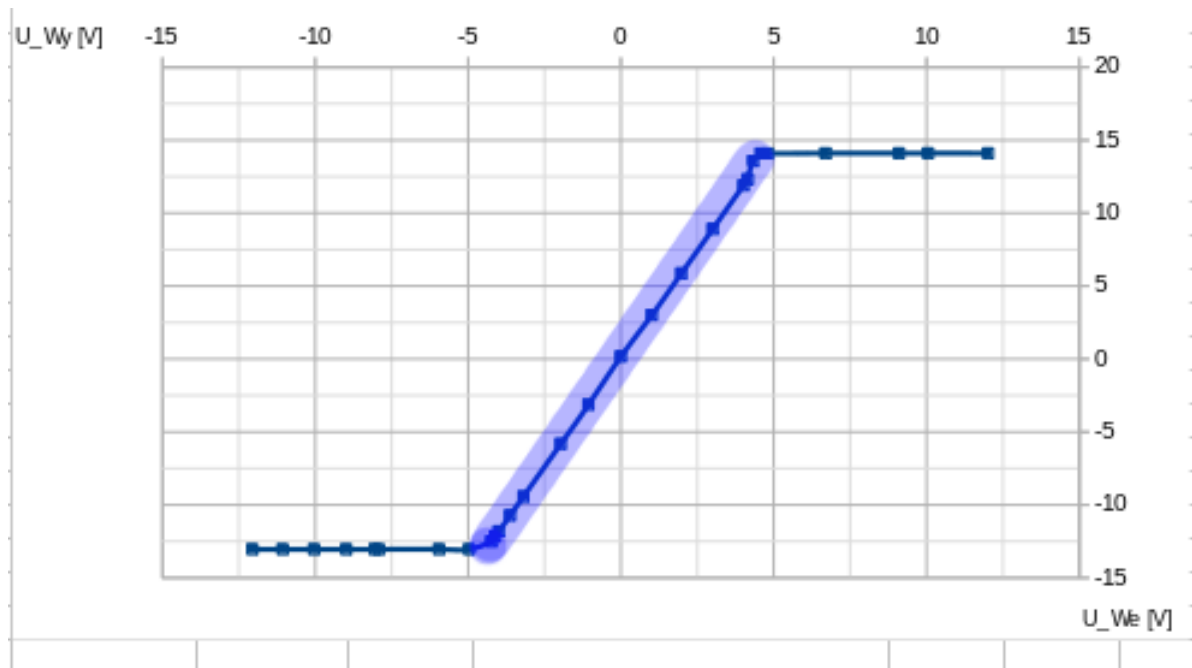
5. Wykresy



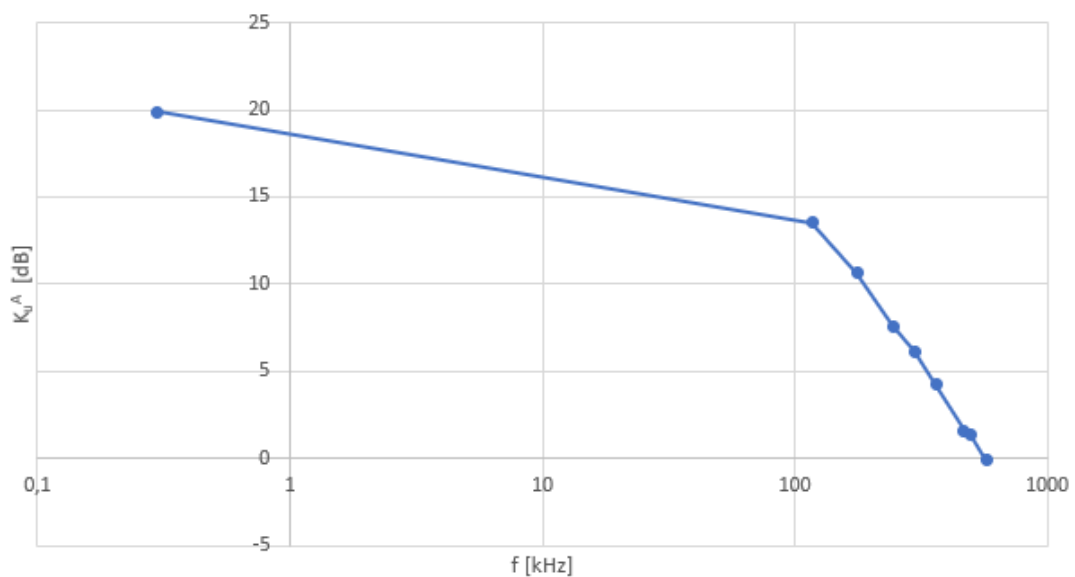
Wykres 1a wykres charakterystyki przejściowej wzmacniacza operacyjnego w układzie odwracającym z zaznaczonym fragmentem wykorzystanym do wyznaczenia wzmocnienia napięciowego (**obliczenia w 6.1**)



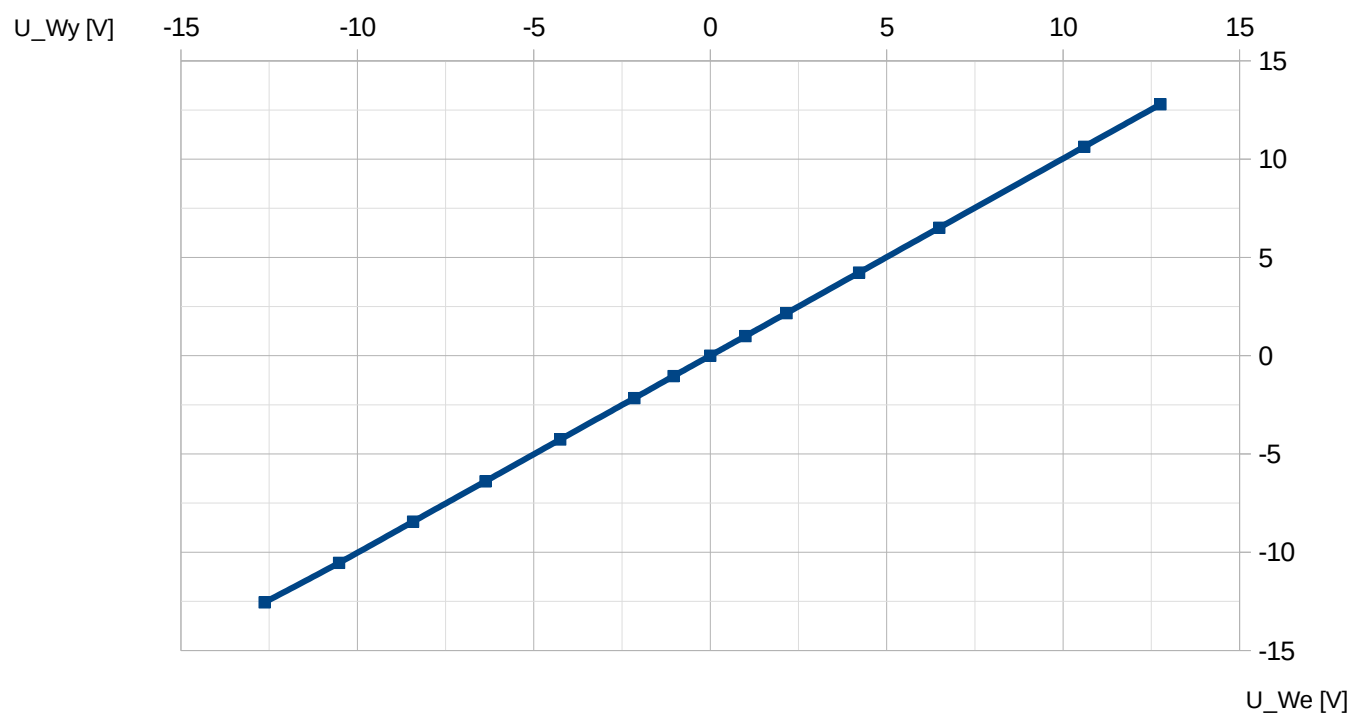
Wykres 1b Wykres zależności amplitudowego współczynnika wzmocnienia wzmacniacza odwracającego od częstotliwości wzmacnianego zmiennego napięcia dla ustalonej kombinacji $Z1 = 5 \text{ k}\Omega$ oraz $Z2 = 50 \text{ k}\Omega$



Wykres 2a wykres charakterystyki przejściowej wzmacniacza operacyjnego w układzie nieodwracającym z zaznaczonym fragmentem wykorzystanym do wyznaczenia wzmocnienia napięciowego



Wykres 2b Wykres zależności amplitudowego współczynnika wzmocnienia wzmacniacza nieodwracającego od częstotliwości wzmacnianego zmiennego napięcia dla ustalonej kombinacji $Z_1 = 5 \text{ k}\Omega$ oraz $Z_2 = 50 \text{ k}\Omega$



Wykres 3 wykres charakterystyki przejściowej wzmacniacza operacyjnego w układzie nieodwracającym - wtórnik

6. Wyniki obliczeń

Z1[kΩ]	Z2[kΩ]	UWE [V]	UWY [V]	K_u^t	K_u
10	20	-7,13	13,97	-2	-1,96
10	20	-6,96	13,63	-2	-1,96
10	20	-6,63	12,99	-2	-1,96
10	20	-6,01	11,78	-2	-1,96
10	20	-5,03	9,87	-2	-1,96
10	20	-4,00	7,84	-2	-1,96
10	20	-3,00	5,88	-2	-1,96
10	20	-1,99	3,90	-2	-1,96
10	20	-0,99	1,94	-2	-1,96
10	20	0,04	-0,07	-2	-2
10	20	1,06	-2,08	-2	-1,96
10	20	2,04	-4,00	-2	-1,96
10	20	3,00	-5,94	-2	-1,98
10	20	4,07	-7,97	-2	-1,96
10	20	5,01	-9,82	-2	-1,96
10	20	5,72	-11,20	-2	-1,96
10	20	6,06	-11,87	-2	-1,96
10	20	6,48	-12,69	-2	-1,96

Tabela 6.1 przedstawienie wyników obliczeń współczynnika wzmocnienia teoretycznego i rzeczywistego dla wzmacniacza operacyjnego w układzie odwracającym

f	U _{WE}	U _{WY}	K_u^{tA}	K_u^A
[kHz]	[V]	[V]	[dB]	[dB]
0,30	0,17	1,68	20,00	19,80
105,50	0,18	0,84	20,00	13,58
171,90	0,18	0,55	20,00	9,93
222,60	0,17	0,42	20,00	7,74
281,00	0,17	0,33	20,00	5,61
325,10	0,17	0,28	20,00	4,26
427,60	0,17	0,21	20,00	1,55
499,80	0,18	0,18	20,00	0,20
527,10	0,17	0,16	20,00	-0,62

Tabela 6.2 przedstawienie wyników obliczeń amplitudowego rzeczywistego i teoretycznego współczynnika wzmocnienia wzmacniacza dla wzmacniacza operacyjnego w układzie odwracającym

Z1	Z2	UWE	UWY	K_u^t	K_u
[kΩ]	[kΩ]	[mV]	[mV]	[1]	[1]
5	10	124	236	2,00	1,90
10	20	124	232	2,00	1,87
15	50	130	396	3,33	3,05
25	20	148	130	0,80	0,88
25	10	224	106	0,40	0,47
15	100	224	1480	6,67	6,61
30	100	228	760	3,33	3,33

Tabela 6.3 przedstawienie wyników obliczeń współczynnika wzmocnienia teoretycznego i rzeczywistego dla wzmacniacza operacyjnego w układzie odwracającym dla zmiennych napięć

RS1	RL	UWE	ΔUWE	UWY	ΔUWY	RWE	ΔRWE
[kΩ]	[kΩ]	[V]	[V]	[V]	[V]	[kΩ]	[kΩ]
-	∞	-5,03	0,01	9,85	0,07	-	-
10	∞	-5,03	0,01	4,98	0,05	10,23	0,15

Tabela 6.4 przedstawienie wyników obliczeń rezystancji wejściowej RWE oraz złożonej niepewności pomiarowej ΔRWE dla wzmacniacza odwracającego na podstawie wzorów 4a oraz 5a

RS1	RL	UWE	ΔUWE	UWY	ΔUWY	RWY	ΔRWY
[kΩ]	[kΩ]	[V]	[V]	[V]	[V]	[kΩ]	[kΩ]
-	∞	-6,13	0,01	12,00	0,08	-	-
-	20	-6,13	0,01	12,00	0,08	0,00	0,05
-	10	-6,13	0,01	12,00	0,08	0,00	0,02
-	5	-6,13	0,01	12,00	0,08	0,00	0,01
-	2	-6,13	0,01	12,00	0,08	0,00	0

Tabela 6.5 przedstawienie wyników obliczeń rezystancji wyjściowej RWY oraz złożonej niepewności pomiarowej ΔRWY dla wzmacniacza odwracającego na podstawie wzorów 4b oraz 5b

Z1 [kΩ]	Z2 [kΩ]	UWE [V]	ΔUWE [V]	UWY [V]	ΔUWY [V]	Kut	Ku
10,00	20,00	-4,24	0,01	-12,51	0,08	-2,00	2,95
10,00	20,00	-4,11	0,01	-12,17	0,08	-2,00	2,96
10,00	20,00	-3,99	0,01	-11,81	0,08	-2,00	2,96
10,00	20,00	-3,62	0,01	-10,72	0,07	-2,00	2,96
10,00	20,00	-3,19	0,01	-9,43	0,07	-2,00	2,96
10,00	20,00	-1,96	0,01	-5,82	0,05	-2,00	2,96
10,00	20,00	-1,06	0,01	-3,14	0,04	-2,00	2,96
10,00	20,00	0,01	0,01	0,17	0,02	-2,00	34,00
10,00	20,00	1,02	0,01	3,02	0,04	-2,00	2,96
10,00	20,00	1,98	0,01	5,87	0,05	-2,00	2,96
10,00	20,00	3,01	0,01	8,91	0,07	-2,00	2,96
10,00	20,00	4,02	0,01	11,90	0,08	-2,00	2,96
10,00	20,00	4,16	0,01	12,31	0,08	-2,00	2,96
10,00	20,00	4,33	0,01	13,56	0,09	-2,00	3,13
10,00	20,00	4,58	0,01	14,09	0,09	-2,00	3,08
10,00	20,00	4,81	0,01	14,09	0,09	-2,00	2,93

Tabela 6.6 przedstawienie wyników obliczeń współczynnika wzmocnienia teoretycznego i rzeczywistego dla wzmacniacza operacyjnego w układzie nieodwracającym

f	U _{WE}	U _{WY}	K _u ^{tA}	K _u ^A
[kHz]	[V]	[V]	[dB]	[dB]
0,30	152,00	1500,00	20,00	19,88
117,20	152,00	720,00	20,00	13,51
176,70	148,00	504,00	20,00	10,64
245,60	148,00	354,00	20,00	7,57
297,10	150,00	304,00	20,00	6,14
364,00	150,00	244,00	20,00	4,23
466,10	150,00	180,00	20,00	1,58
496,50	150,00	176,00	20,00	1,39
576,00	150,00	148,00	20,00	-0,12

Tabela 6.7 przedstawienie wyników obliczeń amplitudowego rzeczywistego i teoretycznego współczynnika wzmocnienia wzmacniacza dla wzmacniacza operacyjnego w układzie nieodwracającym

Z1	Z2	UWE	UWY	K_u^t	K_u
[kΩ]	[kΩ]	[mV]	[mV]	[1]	[1]
5,00	10,00	146,00	408,00	2,00	2,79
10,00	20,00	148,00	408,00	2,00	2,76
15,00	50,00	146,00	600,00	3,33	4,11
25,00	20,00	146,00	252,00	0,80	1,73
25,00	10,00	148,00	200,00	0,40	1,35
15,00	100,00	154,00	1100,00	6,67	7,14
30,00	100,00	150,00	616,00	3,33	4,11
25,00	1000,00	148,00	5600,00	40,00	37,84

Tabela 6.8 przedstawienie wyników obliczeń współczynnika wzmocnienia teoretycznego i rzeczywistego dla wzmacniacza operacyjnego w układzie nieodwracającym dla zmiennych napięć

RS2/3 [kΩ]	RL [kΩ]	UWE [V]	ΔUWE [V]	UWY [V]	ΔUWY [V]	RWE [kΩ]	ΔRWE [kΩ]
-	∞	3,03	0,01	8,99	0,07	-	-
300	∞	3,03	0,01	8,98	0,07	269400	1749753
10000	∞	3,03	0,01	8,74	0,06	349600	127237

Tabela 6.9 przedstawienie wyników obliczeń rezystancji wejściowej RWE oraz złożonej niepewności pomiarowej ΔRWE dla wzmacniacza nieodwracającego na podstawie wzorów 3a oraz 5a

RS2/3 [kΩ]	RL [kΩ]	UWE [V]	ΔUWE [V]	UWY [V]	ΔUWY [V]	RWY [kΩ]	ΔRWY [kΩ]
-	∞	4,06	0,01	12,02	0,08	-	-
-	20	4,06	0,01	12,02	0,08	0,00	0,07
-	10	4,06	0,01	12,02	0,08	0,00	0,03
-	5	4,06	0,01	12,02	0,08	0,00	0,02
-	2	4,06	0,01	12,02	0,08	0,00	0,01

Tabela 6.10 przedstawienie wyników obliczeń rezystancji wyjściowej RWY oraz złożonej niepewności pomiarowej ΔRWY dla wzmacniacza nieodwracającego na podstawie wzorów 3b oraz 5b

7. Wnioski

Po przeanalizowaniu wyników doświadczenia oraz obliczonych współczynników wzmocnienia i rezystancji wyjściowych i wejściowych oraz odpowiadających im niepewności złożonych można uznać doświadczenie za zakończone powodzeniem. Zarówno wartości współczynników wzmocnień jak i amplitudowych współczynników wzmocnień są zbliżone do ich teoretycznych odpowiedników a wartości rezystancji wyjściowej i wejściowej są odpowiedniego rzędu. Wyniki rezystancji wejściowej dla wzmacniacza nieodwracającego są niewiarygodne ze względu na ich bardzo dużą niepewność wynikającą z niepewności pomiarowej ΔU_{wy} . Pozostałe obliczone niepewności pomiarowe wszystkich powyższych wartości zgadzają się z danymi tabelarycznymi.

8. Literatura

- [1] M. Rusek, J. Pasierbiński, Elementy i układy elektroniczne w pytaniach i odpowiedziach, WNT, Warszawa, 1999.
- [2] M. Nadachowski, Z. Kulka, Scalone układy analogowe, WKiŁ, Warszawa, 1985.
- [3] Z. Nosal, J. Baranowski, Układy elektroniczne. Cz. I. Układy analogowe liniowe Seria Podręczniki Akademickie, (Elektronika, Informatyka, Telekomunikacja), WNT, Warszawa, 2003.
- [4] A. Filipowski, Układy elektroniczne analogowe i cyfrowe, Seria Podręczniki Akademickie, (Elektronika, Informatyka, Telekomunikacja), WNT, Warszawa, 2005.
- [5] P. Horowitz, W. Hill, Sztuka elektroniki. Cz. 1., (tłum. ang.), WKiŁ, Warszawa, 2003.
- [6] Instrukcje obsługi do multimetrów, zasilacza laboratoryjnego, generatora funkcyjnego i oscyloskopu dostępne na stronie internetowej:
<https://fizyka.p.lodz.pl/pl/dla-studentow/podstawy-elektroniki-laboratorium/zasoby/>
- [7] Ł. Piskorski, Wyznaczanie niepewności pomiarów, Skrypt PŁ, Łódź, 2019 (WIKAMP, Pracownia Fizyczna): <https://ftims.edu.p.lodz.pl/mod/resource/view.php?id=62256>
- [8] E08IS – Instrukcja wykonania zadania E08 Instytut Fizyki WFTIMS

9. Otrzymany dokument z wynikami

Ćwiczenie E08IS "Wzmacniacz operacyjny" - wyniki pomiarów, zestaw 4

Aparatura użyta w częściach 5.1 i 5.2:

- 1). Moduł doświadczalny W-03
- 2). Zespół Źródeł Sterujących, nr inw. ZŻS-06
- 3). Multimetr UT-804, nr inw. I3/RPO/010/T8/50/1 - do pomiaru UWE, zakres 40 V DC
- 4). Multimetr Protek 506, nr inw. WD043.01-005-203 - do pomiaru UWY, zakres 40 V DC
- 5). Generator funkcyjny DF1641B, nr inw. WD045.01-007-203
- 6). Oscyloskop cyfrowy SIGLENT SDS 1052DL, nr inw. I3/RPO/010/T8/68/3
- 7). Zasilacz Siglent SPD3303D, nr inw. I3/RPO/010/T8/48/2

5.1. Wzmacniacz w układzie odwracającym

5.1.1. Wyznaczenie charakterystyki przejściowej wzmacniacza operacyjnego

Z1	Z2	Napięcie wejściowe		Napięcie wyjściowe	
[kΩ]	[kΩ]	UWE [V]	ΔUWE [V]	UWY [V]	ΔUWY [V]
10	20	-12,015 0,011	14,07	0,090	
10	20	-11,039 0,011	14,07	0,090	
10	20	-10,047 0,010	14,07	0,090	
10	20	-9,023 0,010	14,07	0,090	
10	20	-8,033 0,009	14,07	0,090	
10	20	-7,131 0,009	13,97	0,090	
10	20	-6,960 0,008	13,63	0,088	
10	20	-6,634 0,008	12,99	0,085	
10	20	-6,011 0,008	11,78	0,079	
10	20	-5,032 0,008	9,87	0,069	
10	20	-3,999 0,007	7,84	0,059	
10	20	3,003 0,007	5,88	0,049	
10	20	-1,990 0,006	3,90	0,040	
10	20	-0,991 0,005	1,94	0,030	
10	20	0,035 0,005	-0,07	0,020	
10	20	1,062 0,006	-2,08	0,030	
10	20	2,039 0,006	-4,00	0,040	
10	20	3,003 0,007	-5,94	0,050	
10	20	4,070 0,007	-7,97	0,060	
10	20	5,011 0,008	-9,82	0,069	
10	20	5,716 0,008	-11,20	0,076	
10	20	6,061 0,008	-11,87	0,079	
10	20	6,475 0,008	-12,69	0,083	
10	20	7,058 0,009	-13,04	0,085	

10	20	8,029	0,009	-13,04	0,085
10	20	10,128	0,010	-13,04	0,085
10	20	11,924	0,011	-13,04	0,085

5.1.2. Pomiar rezystancji wejściowej wzmacniacza operacyjnego.

RS1	RL	Napięcie wejściowe		Napięcie wyjściowe	
[kΩ]	[kΩ]	UWE [V]	ΔUWE [V]	UWY [V]	ΔUWY [V]
-	∞	-5,030	0,008	9,85	0,069
10	∞	-5,030	0,008	4,98	0,045

5.1.3. Pomiar rezystancji wyjściowej wzmacniacza operacyjnego

RS1	RL	Napięcie wejściowe		Napięcie wyjściowe	
[kΩ]	[kΩ]	UWE [V]	ΔUWE [V]	UWY [V]	ΔUWY [V]
-	∞	-6,126	0,008	12,00	0,080
-	20	-6,126	0,008	12,00	0,080
-	10	-6,126	0,008	12,00	0,080
-	5	-6,126	0,008	12,00	0,080
-	2	-6,126	0,008	12,00	0,080

5.1.4. Pomiar pasma przenoszenia wzmacniacza operacyjnego

Z1 = 5 kΩ, Z2 = 50 kΩ

f	UWE	UWY	Uwaga:
[kHz]	[V]	[V]	napięcia UWE i UWY zmierzone jako międzyszczytowe.
0,3010	0,172	1,68	
105,5	0,176	0,840	
171,9	0,176	0,552	
222,6	0,174	0,424	
281,0	0,174	0,332	
325,1	0,174	0,284	
427,6	0,174	0,208	
499,8	0,176	0,180	
527,1	0,174	0,162	

5.1.5. Pomiar wsp. wzmocnienia wzmacniacza operacyjnego dla zmiennych napięć

Z1	Z2	UWE	UWY	Uwaga:
[kΩ]	[kΩ]	[mV]	[mV]	napięcia UWE i UWY zmierzone jako międzyszczytowe.
5	10	124	236	

10 20 124 232
 15 50 130 396
 25 20 148 130
 25 10 224 106
 15 100 224 1480
 30 100 228 760

5.2. Wzmacniacz w układzie nieodwracającym

5.2.1. Wyznaczenie charakterystyki przejściowej wzmacniacza operacyjnego

Z1	Z2	Napięcie wejściowe		Napięcie wyjściowe	
[kΩ]	[kΩ]	UWE [V]	ΔUWE [V]	UWY [V]	ΔUWY [V]
10	20	-12,052	0,011	-13,05	0,085
10	20	-11,062	0,011	-13,05	0,085
10	20	-10,036	0,010	-13,05	0,085
10	20	-8,982	0,009	-13,05	0,085
10	20	-8,054	0,009	-13,05	0,085
10	20	-7,920	0,009	-13,05	0,085
10	20	-5,949	0,008	-13,05	0,085
10	20	-4,963	0,007	-13,05	0,085
10	20	-4,235	0,007	-12,51	0,083
10	20	-4,114	0,007	-12,17	0,081
10	20	-3,991	0,007	-11,81	0,079
10	20	-3,622	0,007	-10,72	0,074
10	20	-3,187	0,007	-9,43	0,067
10	20	-1,964	0,006	-5,82	0,049
10	20	-1,061	0,006	-3,14	0,036
10	20	0,005	0,005	0,17	0,021
10	20	1,019	0,006	3,02	0,035
10	20	1,981	0,006	5,87	0,049
10	20	3,008	0,007	8,91	0,065
10	20	4,018	0,007	11,90	0,080
10	20	4,158	0,007	12,31	0,082
10	20	4,333	0,007	13,56	0,088
10	20	4,582	0,007	14,09	0,090
10	20	4,806	0,007	14,09	0,090
10	20	6,701	0,008	14,10	0,091
10	20	9,105	0,010	14,10	0,091
10	20	10,055	0,010	14,10	0,091
10	20	12,020	0,011	14,10	0,091

5.2.2. Pomiar rezystancji wejściowej wzmacniacza operacyjnego.

RS2/RS3	RL	Napięcie wejściowe		Napięcie wyjściowe	
[kΩ]	[kΩ]	UWE [V]	ΔUWE [V]	UWY [V]	ΔUWY [V]
-	∞	3,034	0,007	8,99	0,065
300	∞	3,034	0,007	8,98	0,065

10000 ∞ 3,034 0,007 8,74 0,064

5.2.3. Pomiar rezystancji wyjściowej wzmacniacza operacyjnego

RS2/RS3 [k Ω]	RL [k Ω]	Napięcie wejściowe		Napięcie wyjściowe	
		UWE [V]	Δ UWE [V]	UWY [V]	Δ UWY [V]
- ∞	4,060	0,007	12,02	0,080	
- 20	4,060	0,007	12,02	0,080	
- 10	4,060	0,007	12,02	0,080	
- 5	4,060	0,007	12,02	0,080	
- 2	4,060	0,007	12,02	0,080	

5.2.4. Pomiar pasma przenoszenia wzmacniacza operacyjnego

Z1 = 5 k Ω , Z2 = 50 k Ω

f [kHz]	UWE [V]	UWY [V]	Uwaga:
0,2990	152	1500	napięcia UWE i UWY zmierzone jako międzyszczytowe.
117,2	152	720	
176,7	148	504	
245,6	148	354	
297,1	150	304	
364,0	150	244	
466,1	150	180	
496,5	150	176	
576,0	150	148	

5.2.5. Pomiar wsp. wzmocnienia wzmacniacza operacyjnego dla zmiennych napięć

Z1 [k Ω]	Z2 [k Ω]	UWE [V]	UWY [V]	Uwaga:
5	10	146	408	napięcia UWE i UWY zmierzone jako międzyszczytowe.
10	20	148	408	
15	50	146	600	
25	20	146	252	
25	10	148	200	
15	100	154	1100	
30	100	150	616	
25	1000	148	5600	

5.3. Wzmacniacz w układzie nieodwracającym – wtórnik

Aparatura użyta w części 5.3:

- 1). Moduł doświadczalny W-03
- 2). Zespół Źródeł Sterujących, nr inw. ZŻS-06
- 3). Multimetr Protek 506, nr inw. WD043.01-005-203 - do pomiaru UWE, zakres 40 V DC
- 4). Multimetr Kemot KT890, nr inw. I3/2.03/2017-K/4 - do pomiaru UWY, zakres 20 V DC
- 5). Generator funkcyjny DF1641B, nr inw. WD045.01-007-203
- 6). Oscyloskop cyfrowy SIGLENT SDS 1052DL, nr inw. I3/RPO/010/T8/68/3
- 7). Zasilacz Siglent SPD3303D, nr inw. WD051.02-004-203

5.3.1. Wyznaczenie charakterystyki przejściowej wzmacniacza operacyjnego

Z1	Z2	Napięcie wejściowe		Napięcie wyjściowe	
[kΩ]	[kΩ]	UWE [V]	ΔUWE [V]	UWY [V]	ΔUWY [V]
∞	0,0	-12,63	0,011	-12,55	0,083
∞	0,0	-10,52	0,010	-10,54	0,073
∞	0,0	-8,42	0,009	-8,44	0,062
∞	0,0	-6,37	0,008	-6,39	0,052
∞	0,0	-4,25	0,007	-4,26	0,041
∞	0,0	-2,15	0,006	-2,16	0,031
∞	0,0	-1,04	0,006	-1,04	0,025
∞	0,0	0,00	0,005	0,00	0,020
∞	0,0	1,00	0,006	1,00	0,025
∞	0,0	2,16	0,006	2,16	0,031
∞	0,0	4,22	0,007	4,23	0,041
∞	0,0	6,49	0,008	6,51	0,053
∞	0,0	10,60	0,010	10,63	0,073
∞	0,0	12,76	0,011	12,79	0,084

5.3.2. Pomiar rezystancji wejściowej wzmacniacza operacyjnego.

RS2/RS3	RL	Napięcie wejściowe		Napięcie wyjściowe	
[kΩ]	[kΩ]	UWE [V]	ΔUWE [V]	UWY [V]	ΔUWY [V]
-	∞	10,57	0,010	10,60	0,073
300	∞	10,57	0,010	10,60	0,073
10000	∞	10,57	0,010	10,58	0,073

5.3.3. Pomiar rezystancji wyjściowej wzmacniacza operacyjnego

RS2/RS3	RL	Napięcie wejściowe		Napięcie wyjściowe	
[kΩ]	[kΩ]	UWE [V]	ΔUWE [V]	UWY [V]	ΔUWY [V]
-	∞	10,57	0,010	10,60	0,073
-	20	10,57	0,010	10,60	0,073
-	10	10,57	0,010	10,60	0,073
-	5	10,57	0,010	10,60	0,073
-	2	10,57	0,010	10,60	0,073

5.3.4. Pomiar pasma przenoszenia wzmacniacza operacyjnego

$Z1 = \infty$, $Z2 = 0 \text{ k}\Omega$

f	UWE	UWY
[kHz]	[mV]	[mV]
0,2963	18,8	20,0
2,951	18,8	20,4
30,12	18,4	20,0
310,0	18,8	20,4
634,1	18,8	20,4
814,2	18,8	19,6
910,0	18,4	19,2
999,3	18,4	17,6
1101	18,4	16,8
1201	18,0	15,6
1300	18,4	14,8
1401	18,0	13,6
1451	18,4	13,2
1508	18,4	12,8