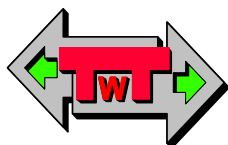
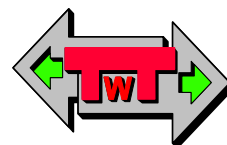


ZESPÓŁ LABORATORIÓW TELEMATYKI TRANSPORTU
ZAKŁAD TELEKOMUNIKACJI W TRANSPORCIE



WYDZIAŁ TRANSPORTU
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ



LABORATORIUM ELEKTRONIKI

INSTRUKCJA DO ĆWICZENIA NR 8

WZMACNIACZ OPERACYJNY

DO UŻYTKU WEWNĘTRZNEGO

WARSZAWA 2021

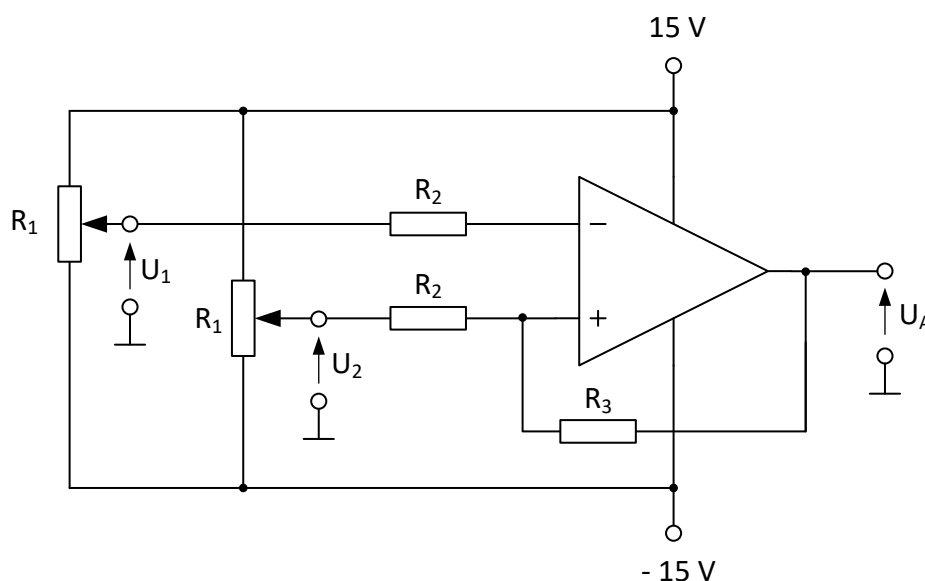
A. Cel ćwiczenia

- przedstawienie zachowania wzmacniacza operacyjnego,
- zapoznanie się z zasadą ujemnego sprzężenia zwrotnego,
- zastosowanie wzmacniacza operacyjnego, jako stabilizatora napięcia.

B. Część pomiarowa rzeczywista

1) Przedstawienie zachowania nie podłączonego wzmacniacza operacyjnego

Układ do badania wzmacniacza przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Wzmacniacz operacyjny jako komparator

Zbuduj obwód zgodnie z powyższym schematem (jednakże bez R_3 , tzn. otwarta pętla).

a) Regulując napięciami U_1 i U_2 za pomocą potencjometrów R_1 , obserwuj napięcie wyjściowe U_A na oscyloskopie i na mierniku.

Określ jakie wartości napięcia U_2 powodują komparację napięcia U_A na wyjściu dla trzech różnych wartości napięcia U_1 .

U_1 [V]					
U_2 [V]					
U_A [V]					

Tab. 1. Zjawisko komparacji przy otwartej pętli

Wyjaśnij mechanizm zaobserwowanej komparacji.

b) Teraz połącz $R_3 = 100 \text{ k}\Omega$ pomiędzy wejściem nieodwracającym i wyjściem wzmacniacza operacyjnego. Dla trzech różnych wartości napięcia U_1 określ napięcie U_2 , powodujące przełączenie napięcia wyjścia z $+U_A$ na $-U_A$ (lub odwrotnie).

dla $R_3 = 100 \text{ [k}\Omega]$					
$U_1 \text{ [V]}$					
$U_2 \text{ [V]}$					
$U_A \text{ [V]}$					

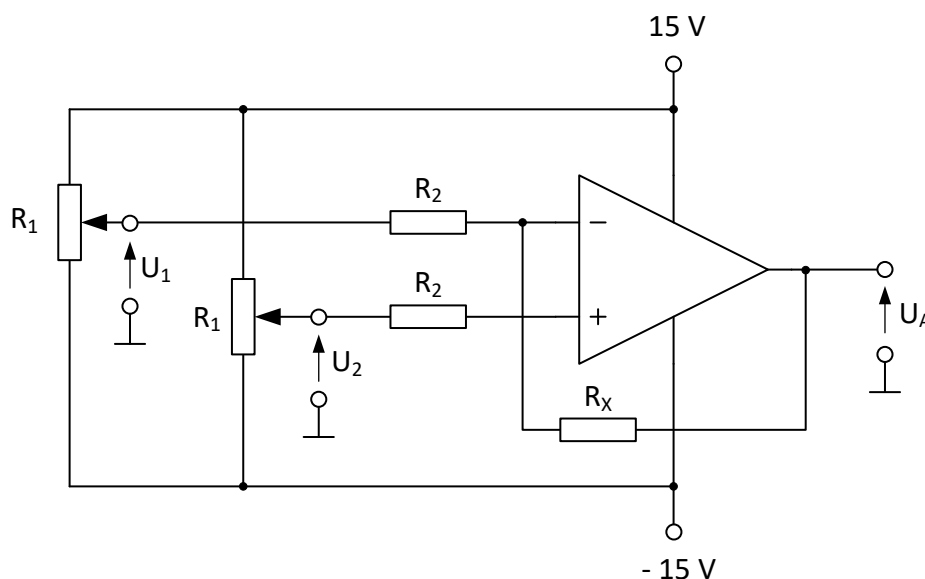
Tab. 2. Zjawisko komparacji przy $R_3 = 100 \text{ k}\Omega$

c) Czynności z punktu b) wykonaj także dla układu, w którym rezystor $R_3 = 100 \text{ k}\Omega$ zastąpiono $R_3 = 169 \text{ k}\Omega$. Jak teraz zmieniła się pętla histerezy? Jak zmieniło się zachowanie komparatora?

dla $R_3 = 169 \text{ [k}\Omega]$					
$U_1 \text{ [V]}$					
$U_2 \text{ [V]}$					
$U_A \text{ [V]}$					

Tab. 3. Zjawisko komparacji przy $R_3 = 169 \text{ k}\Omega$

d) Zestaw układ według rys. 2 :



Rys. 2. Wzmacniacz operacyjny z ujemnym sprzężeniem zwrotnym

Podłącz kolejno w miejsce rezystora R_X rezystory o wartości: $100 \text{ [k}\Omega]$, $47 \text{ [k}\Omega]$ i $22 \text{ [k}\Omega]$. Rezystor R_X jest podłączony pomiędzy wejście odwracające i wyjście wzmacniacza operacyjnego.

Zdejmij charakterystyki $U_A = f(U_1)$ dla różnych wartości rezystancji przy $U_2 = \text{const}$. Wartość napięcia U_2 dobierz tak, aby umożliwiała ona zmianę wartości U_A w całym zakresie zmian U_1 , dla wszystkich wartości rezystancji R_X . Uzyskane wyniki pomiarowe zanotuj w tabelach 4÷6.

$R_X = 100 \text{ [k}\Omega\text{]}$							
$U_1 \text{ [V]}$							
$U_A \text{ [V]}$							

Tab. 4. Charakterystyka $U_A = f(U_1)$ przy $R_X = 100 \text{ k}\Omega$

$R_X = 47 \text{ [k}\Omega\text{]}$							
$U_1 \text{ [V]}$							
$U_A \text{ [V]}$							

Tab. 5. Charakterystyka $U_A = f(U_1)$ przy $R_X = 47 \text{ k}\Omega$

$R_X = 22 \text{ [k}\Omega\text{]}$							
$U_1 \text{ [V]}$							
$U_A \text{ [V]}$							

Tab. 6. Charakterystyka $U_A = f(U_1)$ przy $R_X = 22 \text{ k}\Omega$

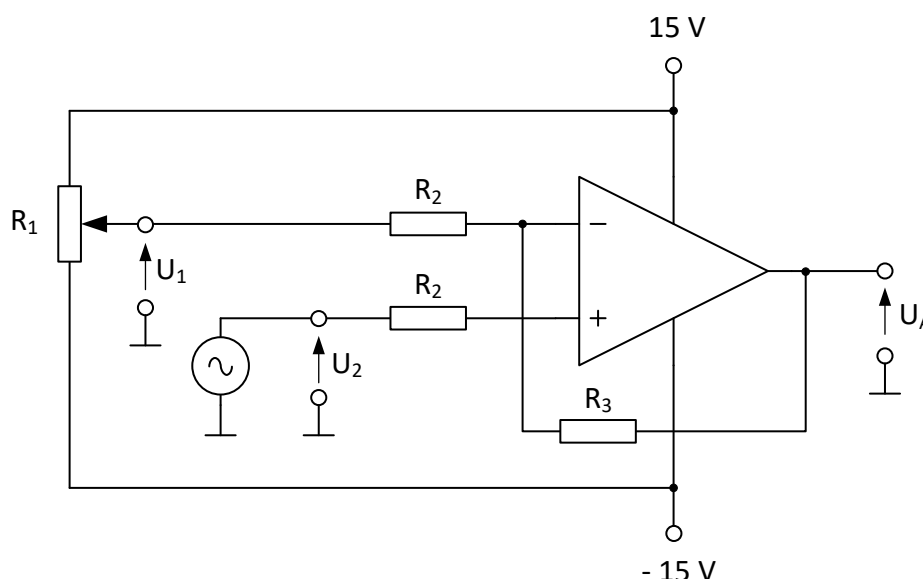
Przeanalizuj uzyskane wyniki i na ich podstawie wykreśl charakterystykę $U_A = f(U_1)$ dla trzech wskazanych wartości rezystancji R_X .

Określ wartości wzmocnienia k_u dla poszczególnych wartości rezystora sprzęgającego R_X , wykorzystując liniową część charakterystyk.

Jaki jest wpływ rezystora R_X na wzmocnienie?

2) Regulowanie sygnałów sinusoidalnych.

Sprawdź czy układ zmontowany na tablicy odpowiada układowi z rysunku 3.



Rys. 3. Wzmacniacz operacyjny jako regulator sygnałów sinusoidalnych

Podłącz generator funkcyjny i ustaw napięcie zmienne: $U_2 = 1,5 \text{ V}$ z częstotliwością $f = 1 \text{ kHz}$. Ustaw potencjometr R_1 na wartość średnią. Nie podłączaj rezystora R_3 .

Podłącz U_2 i U_A do oscyloskopu i przerysuj otrzymany wykres.

Regulując potencjometrem R_1 zdejmij charakterystykę współczynnika wypełnienia W_W w funkcji napięcia U_1 i U_A . Uzyskane wyniki pomiarowe zanotuj w tabelach 7 i 8.

$R_2 = 2 \times 33 \text{ [k}\Omega\text{]}$						
W_W						
$U_1 \text{ [V]}$						
$U_A \text{ [V]}$						

Tab. 7. Charakterystyka $W_W = f(U_1)$ oraz $W_W = f(U_A)$ przy $R_2 = 2 \times 33 \text{ k}\Omega$

$R_2 = 2 \times 47 \text{ [k}\Omega\text{]}$						
W_W						
$U_1 \text{ [V]}$						
$U_A \text{ [V]}$						

Tab. 8. Charakterystyka $W_W = f(U_1)$ oraz $W_W = f(U_A)$ przy $R_2 = 2 \times 47 \text{ k}\Omega$

Przeanalizuj uzyskane wyniki i na ich podstawie wykreśl charakterystyki $W_W = f(U_1)$ oraz $W_W = f(U_A)$ dla wskazanych wartości rezystancji R_2 .

Podłącz rezystancję $R_3 = 100 \text{ k}\Omega$ pomiędzy wejściem inercyjnym i wyjściem wzmacniacza. Jak zmieni się charakterystyka napięcia wyjściowego?

Przerysuj otrzymane wykresy napięcia wyjściowego dla trzech różnych wartości R_1 .

Zdejmij charakterystyki zakresu dopuszczalnych zmian U_1 i U_A w funkcji R_3 , tak aby przebieg wyjściowy nie był zniekształcony. Przyjmij następujące wartości R_3 : 22, 39, 47, 69, 100 i 122 [k Ω]. Uzyskane wyniki pomiarowe zanotuj w tabelach 9 i 10.

$R_2 = 2 \times 33 \text{ [k}\Omega\text{]}$							
$R_3 \text{ [k}\Omega\text{]}$		22	39	47	69	100	122
$U_1 \text{ [V]}$	min						
	max						
$U_A \text{ [V]}$	min						
	max						

Tab. 9. Charakterystyka $U_1 = f(R_3)$ oraz $U_A = f(R_3)$ przy $R_2 = 2 \times 33 \text{ k}\Omega$

$R_2 = 2 \times 47 \text{ [k}\Omega\text{]}$							
$R_3 \text{ [k}\Omega\text{]}$		22	39	47	69	100	122
$U_1 \text{ [V]}$	min						
	max						
$U_A \text{ [V]}$	min						
	max						

Tab. 10. Charakterystyka $U_1 = f(R_3)$ oraz $U_A = f(R_3)$ przy $R_2 = 2 \times 47 \text{ k}\Omega$

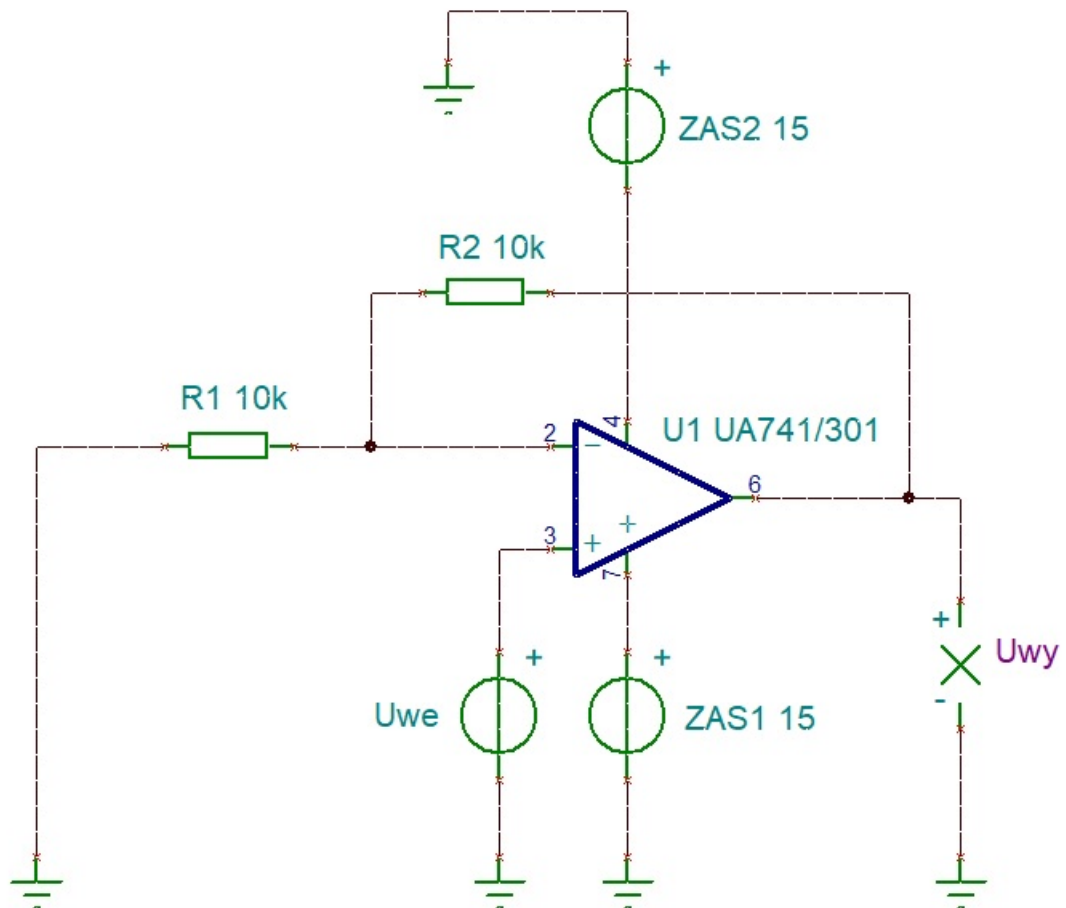
Przeanalizuj uzyskane wyniki i na ich podstawie wykreśl charakterystyki $U_1 = f(R_3)$ oraz $U_A = f(R_3)$ dla wskazanych wartości rezystancji R_2 .

Wykonaj wykres k_u w funkcji R_3 dla dwóch różnych wartości R_2 : $2 \times 33 \text{ [k}\Omega\text{]}$ oraz $2 \times 47 \text{ [k}\Omega\text{]}$. Wartości R_3 przyjmij jak powyżej.

C. Część pomiarowa wirtualna

1) Wzmacniacz operacyjny nieodwracający fazy napięcia wejściowego

W celu zdjęcia wymaganych charakterystyk badanego wzmacniacza nieodwracającego w programie Tina narysuj schemat układu zgodnie z rysunkiem 4.

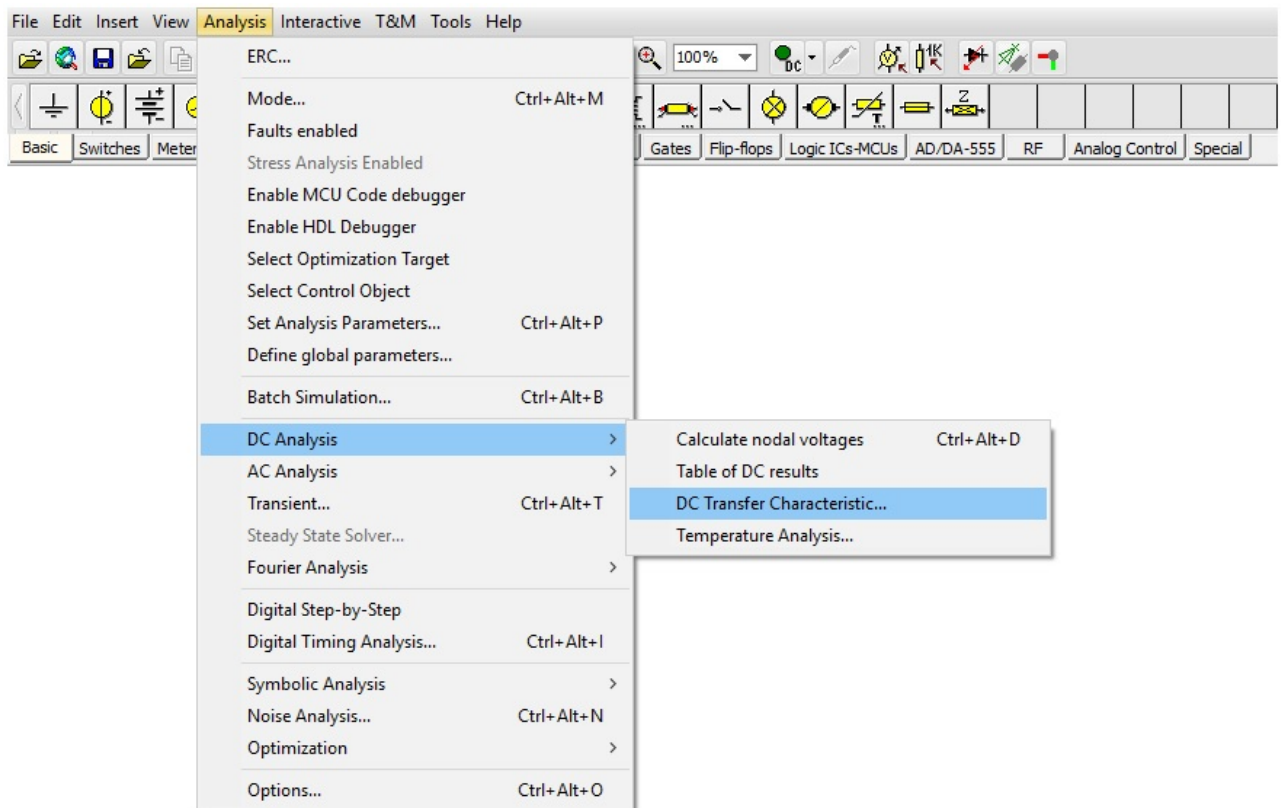


Rys. 4. Schemat układu do zdejmowania charakterystyk wzmacniacza nieodwracającego w programie Tina

Zdejmij charakterystykę $U_{wy} = f(U_{we})$, przyjmując następujące wartości rezystorów:

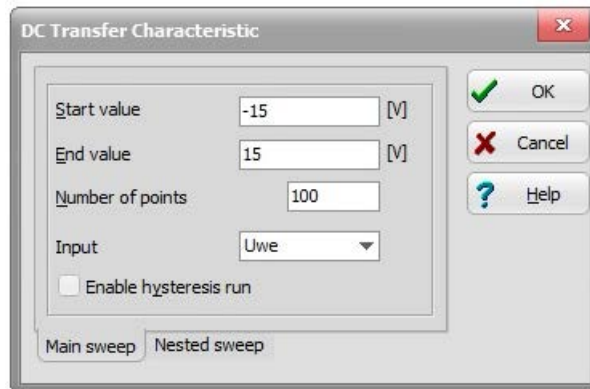
- $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ (tabela 11),
- $R_1 = R_2 = 20 \text{ k}\Omega$ (tabela 12)
- $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$ (tabela 13) oraz
- $R_1 = 20 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ (tabela 14).

Aby tego dokonać przeprowadź analizę typu DC Transfer Characteristic, wybierając wspomniany typ analizy z zakładki Analysis (patrz rysunek 5),



Rys. 5. Wybór rodzaju analizy – DC Transfer Characteristic

zaś wymagane dla niej parametry zgodnie z danymi z tabel 11÷14 (np. tak jak na rysunku 6).



Rys. 6. Przykładowe parametry analizy DC Transfer Characteristic

Uzyskane wyniki pomiarowe zanotuj w tabelach 11÷14.

U_{we} [V]	-15	-10	-5	0	5	10	15
U_{wy} [V]							

Tab. 11. Wzmacniacz nieodwracający - tabela pomiarowa $U_{wy} = f(U_{we})$ przy $R_1 = R_2 = 10k\Omega$

U_{we} [V]	-15	-10	-5	0	5	10	15
U_{wy} [V]							

Tab. 12. Wzmacniacz nieodwracający - tabela pomiarowa $U_{wy} = f(U_{we})$ przy $R_1 = R_2 = 20k\Omega$

U_{we} [V]	-15	-10	-5	0	5	10	15
U_{wy} [V]							

Tab. 13. Wzmacniacz nieodwracający - tabela pomiarowa $U_{wy} = f(U_{we})$ przy $R_1 = 10k\Omega$, $R_2 = 20k\Omega$

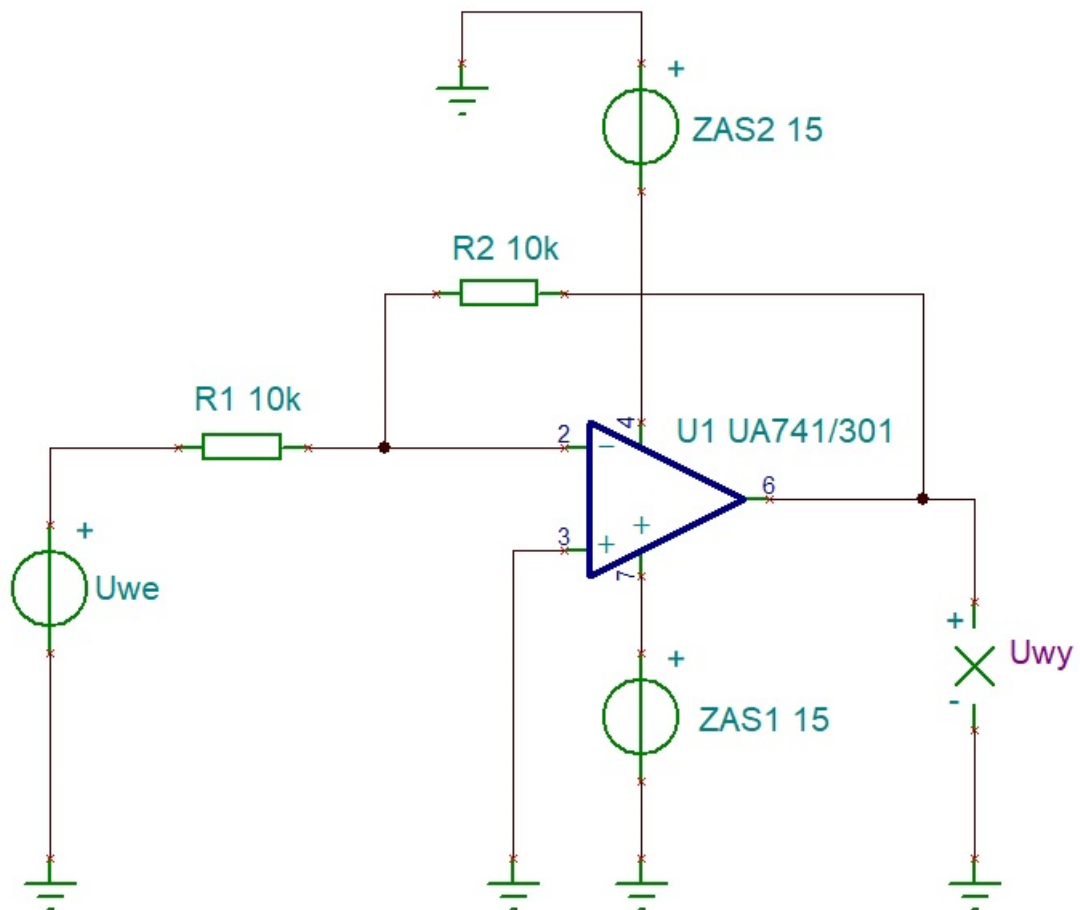
U_{we} [V]	-15	-10	-5	0	5	10	15
U_{wy} [V]							

Tab. 14. Wzmacniacz nieodwracający - tabela pomiarowa $U_{wy} = f(U_{we})$ przy $R_1 = 20k\Omega$, $R_2 = 10k\Omega$

Przeanalizuj uzyskane wyniki i na ich podstawie wykreśl charakterystykę $U_{wy} = f(U_{we})$, dla podanych wartości rezystorów R_1 i R_2 .

2) Wzmacniacz operacyjny odwracający fazę napięcia wejściowego

W celu zdjęcia wymaganych charakterystyk badanego wzmacniacza odwracającego w programie Tina narysuj schemat układu zgodnie z rysunkiem 7.



Rys. 7. Schemat układu do zdejmowania charakterystyk wzmacniacza odwracającego w programie Tina

Zdejmij charakterystykę $U_{wy} = f(U_{we})$, przyjmując następujące wartości rezystorów:

$R_1 = R_2 = 10k\Omega$ (tabela 15),

$R_1 = R_2 = 20k\Omega$ (tabela 16),

$R_1 = 10k\Omega, R_2 = 20k\Omega$ (tabela 17) oraz

$R_1 = 20k\Omega, R_2 = 10k\Omega$ (tabela 18).

Aby tego dokonać przeprowadź analizę typu DC Transfer Characteristic, wybierając wspomniany typ analizy z zakładki Analysis (patrz rysunek 5), zaś wymagane dla niej parametry zgodnie z danymi z tabel 15÷18 (np. tak jak na rysunku 6).

Uzyskane wyniki pomiarowe zanotuj w tabelach 15÷18.

U_{we} [V]	-15	-10	-5	0	5	10	15
U_{wy} [V]							

Tab. 15. Wzmacniacz odwracający - tabela pomiarowa $U_{wy} = f(U_{we})$ przy $R_1 = R_2 = 10k\Omega$

U_{we} [V]	-15	-10	-5	0	5	10	15
U_{wy} [V]							

Tab. 16. Wzmacniacz odwracający - tabela pomiarowa $U_{wy} = f(U_{we})$ przy $R_1 = R_2 = 20k\Omega$

U_{we} [V]	-15	-10	-5	0	5	10	15
U_{wy} [V]							

Tab. 17. Wzmacniacz odwracający - tabela pomiarowa $U_{wy} = f(U_{we})$ przy $R_1 = 10k\Omega, R_2 = 20k\Omega$

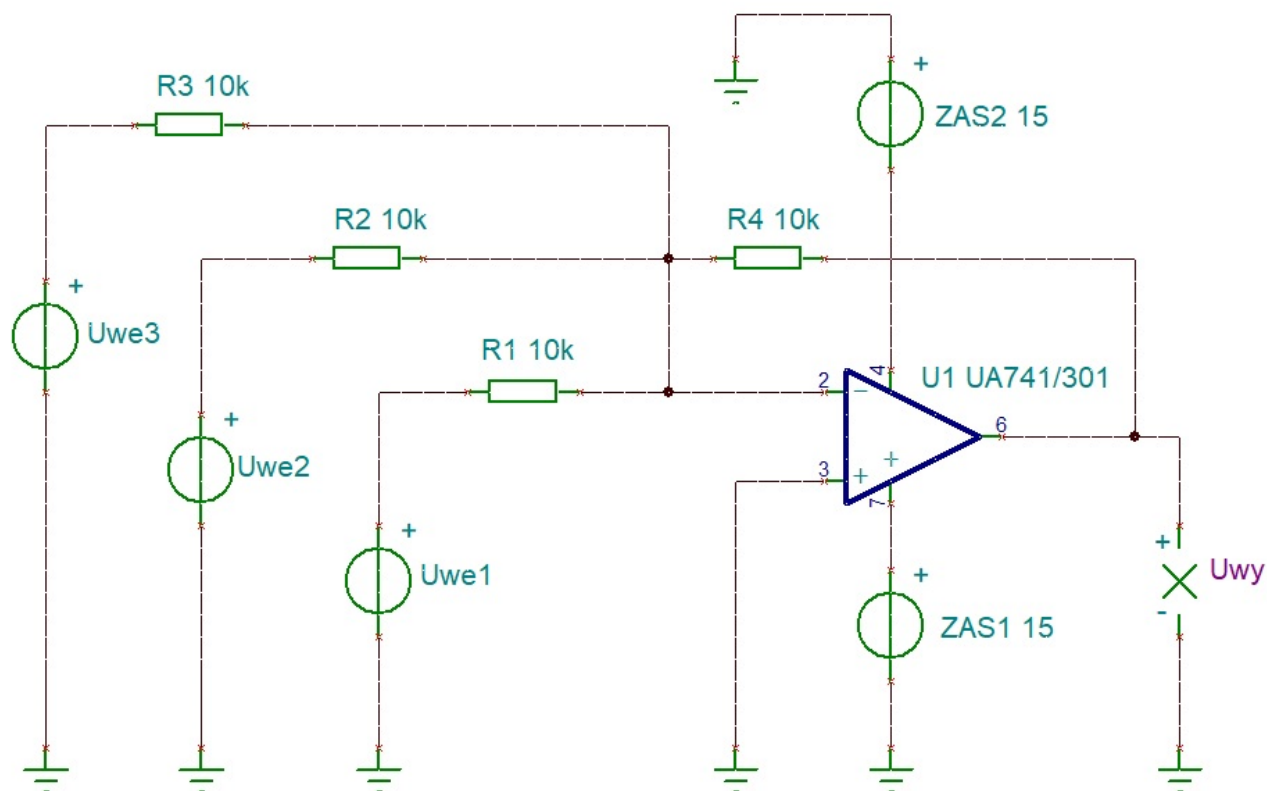
U_{we} [V]	-15	-10	-5	0	5	10	15
U_{wy} [V]							

Tab. 18. Wzmacniacz odwracający - tabela pomiarowa $U_{wy} = f(U_{we})$ przy $R_1 = 20k\Omega, R_2 = 10k\Omega$

Przeanalizuj uzyskane wyniki i na ich podstawie wykreśl charakterystykę $U_{wy} = f(U_{we})$, dla podanych wartości rezystorów R_1 i R_2 .

3) Wzmacniacz operacyjny sumujący

W celu zdjęcia wymaganych charakterystyk badanego wzmacniacza sumującego w programie Tina narysuj schemat układu zgodnie z rysunkiem 8.

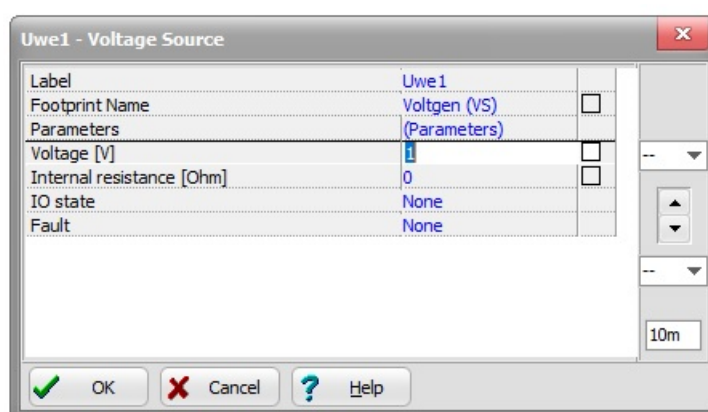


Rys. 8. Schemat układu do zdejmowania charakterystyk wzmacniacza sumującego w programie Tina

Zdejmij następujące charakterystyki badanego wzmacniacza:

- $U_{we1} = f(U_{wy})$, przyjmując $U_{we2} = U_{we3} = 1V$ oraz $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10k\Omega$ (tabela 19),
- $U_{we2} = f(U_{wy})$, przyjmując $U_{we1} = U_{we3} = 1V$ oraz $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10k\Omega$ (tabela 20),
- $U_{we3} = f(U_{wy})$, przyjmując $U_{we1} = U_{we2} = 1V$ oraz $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10k\Omega$ (tabela 21),
- $U_{we3} = f(U_{wy})$, przyjmując $U_{we1} = U_{we2} = 1V$ oraz $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 20k\Omega$ (tabela 22).

Aby tego dokonać ustaw wartości odpowiednich napięć wejściowych na 1V (przykład przedstawiono na rysunku 9).



Rys. 9. Przykładowe ustawienie wartości wybranego napięcia wejściowego ($U_{we1} = 1V$)

Przeprowadź analizę typu DC Transfer Characteristic, wybierając wspomniany typ analizy z zakładki Analysis (patrz rysunek 5), zaś wymagane dla niej parametry zgodnie z danymi z tabel 19÷22.

Uzyskane wyniki pomiarowe zanotuj w tabelach 19÷22.

U_{we1} [V]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_{wy} [V]											

Tab. 19. Wzmacniacz sumujący - tabela pomiarowa $U_{we1} = f(U_{wy})$, przy $U_{we2} = U_{we3} = 1V$ oraz $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10k\Omega$

U_{we2} [V]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_{wy} [V]											

Tab. 20. Wzmacniacz sumujący - tabela pomiarowa $U_{we2} = f(U_{wy})$, przy $U_{we1} = U_{we3} = 1V$ oraz $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10k\Omega$

U_{we3} [V]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_{wy} [V]											

Tab. 21. Wzmacniacz sumujący - tabela pomiarowa $U_{we3} = f(U_{wy})$, przy $U_{we1} = U_{we2} = 1V$ oraz $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10k\Omega$

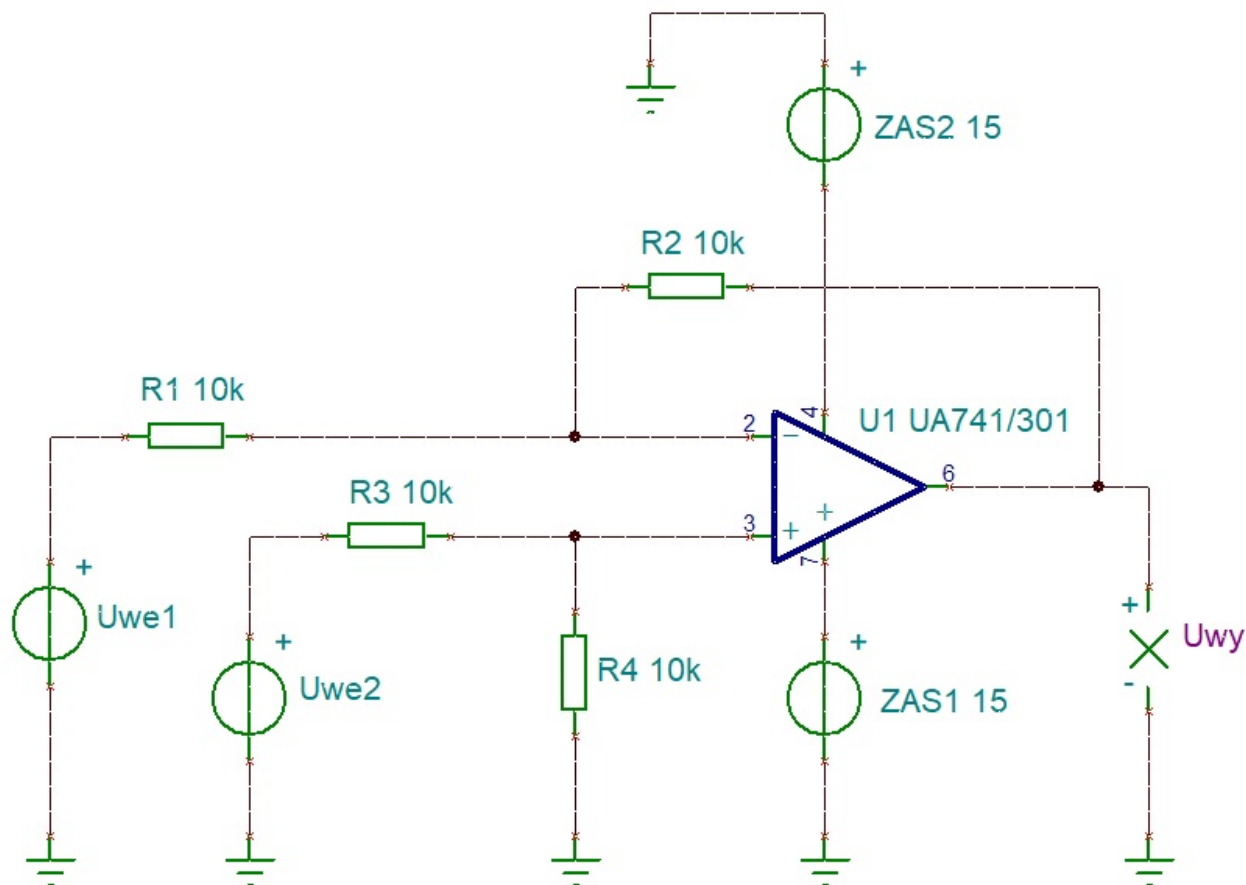
U_{we1} [V]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_{wy} [V]											

Tab. 22. Wzmacniacz sumujący - tabela pomiarowa $U_{we1} = f(U_{wy})$, przy $U_{we2} = U_{we3} = 1V$ oraz $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 20k\Omega$

Przeanalizuj uzyskane wyniki i na ich podstawie wykreśl charakterystykę $U_{wy} = f(U_{we})$, dla podanych wartości rezystorów R_1, R_2, R_3 , i R_4 oraz napięć wejściowych.

4) Wzmacniacz operacyjny różnicowy

W celu zdjęcia wymaganych charakterystyk badanego wzmacniacza różnicowego w programie Tina narysuj schemat układu zgodnie z rysunkiem 10.



Rys. 10. Schemat układu do zdejmowania charakterystyk wzmacniacza różnicowego w programie Tina

Zdejmij charakterystykę $U_{we2} = f(U_{we})$, przyjmując następujące wartości:

- $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10k\Omega$, $U_{we1} = 1V$ (tabela 23),
- $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10k\Omega$, $U_{we1} = 2V$ (tabela 24),
- $R_1 = R_3 = 10k\Omega$, $R_2 = R_4 = 20k\Omega$, $U_{we1} = 1V$ (tabela 25) oraz
- $R_1 = R_3 = 10k\Omega$, $R_2 = R_4 = 30k\Omega$, $U_{we1} = 1V$ (tabela 26).

Przeprowadź analizę typu DC Transfer Characteristic, wybierając wspomniany typ analizy z zakładki Analysis (patrz rysunek 5), zaś wymagane dla niej parametry zgodnie z danymi z tabel 19÷22.

Uzyskane wyniki pomiarowe zanotuj w tabelach 23÷26.

U_{we2} [V]	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_{wy} [V]									

Tab. 23. Wzmacniacz różnicowy - tabela pomiarowa $U_{wy} = f(U_{we2})$, przy $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10k\Omega$, $U_{we1} = 1V$

U_{we2} [V]	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_{wy} [V]									

Tab. 24. Wzmacniacz różnicowy - tabela pomiarowa $U_{wy} = f(U_{we2})$, przy $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10k\Omega$, $U_{we1} = 2V$

U_{we2} [V]	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_{wy} [V]									

Tab. 25. Wzmacniacz różnicowy - tabela pomiarowa $U_{wy} = f(U_{we2})$, przy $R_1 = R_3 = 10k\Omega$, $R_2 = R_4 = 20k\Omega$, $U_{we1} = 1V$

U_{we2} [V]	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_{wy} [V]									

Tab. 26. Wzmacniacz różnicowy - tabela pomiarowa $U_{wy} = f(U_{we2})$, przy $R_1 = R_3 = 10k\Omega$, $R_2 = R_4 = 30k\Omega$, $U_{we1} = 1V$

Przeanalizuj uzyskane wyniki i na ich podstawie wykreśl charakterystykę $U_{wy} = f(U_{we2})$, dla podanych wartości rezystorów R_1 , R_2 , R_3 , i R_4 oraz napięcia wejściowego U_{we1} .

D. Wyposażenie

Elementy układu:

Wzmacniacz operacyjny LM 741	szt. 1
Dioda Zenera $D_1 = ZPY 8.2$	szt. 1
Potencjometr $R_1 = 100 k\Omega$	szt. 2
Potencjometr $R_2 = 10 k\Omega$	szt. 1
Rezystor $R_2 = 33 k\Omega$	szt. 2
Rezystor $R_3 = 100 k\Omega$	szt. 1
Rezystor $R_4 = 47 k\Omega$	szt. 2
Rezystor $R_5 = 10 k\Omega$	szt. 1
Rezystor $R_6 = 33 k\Omega$	szt. 1
Rezystor $R_7 = 1,5 k\Omega$	szt. 1
Rezystor $R_8 = 1 k\Omega$	szt. 1
Rezystor $R_9 = 330 \Omega$	szt. 1
Rezystor $R_{10} = 220 \Omega$	szt. 1
Rezystor $R_{11} = 470 k\Omega$	szt. 1

Sprzęt pomiarowy:

Oscyloskop dwukanałowy	szt. 1
Multimetr	szt. 3

Źródło zasilania:

Zasilacz podwójny	szt. 1
Generator funkcyjny	szt. 1

Akcesoria:

Płyta montażowa.....	szt. 1
Komplet przewodów	szt. 1

Komputer z oprogramowaniem do symulacji TINA

E. Zagadnienia do opracowania

1. Własności idealnego wzmacniacza operacyjnego.
2. Układ pracy wzmacniacza nieodwracającego.
3. Układ pracy wzmacniacza odwracającego.
4. Układ pracy wzmacniacza różnicowego.
5. Układ pracy wzmacniacza sumującego.
6. Układ pracy wzmacniacza całkującego.
7. Układ pracy wzmacniacza różniczkującego.
8. Dodatnie i ujemne sprzężenie zwrotne.

F. Literatura

1. Dobrowolski A., Jachna Z., Majda E., Wierzbowski M.: „Elektronika - ależ to bardzo proste!”, Wydawnictwo BTC, 2013.
2. Górecki P.: „Wzmacniacze operacyjne: podstawy, aplikacje, zastosowania”, Wyd. BTC, Warszawa 2004.
3. Horowitz P., Hill W.: „Sztuka elektroniki. Tom I i II”, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2013.
4. Kaźmierkowski M., Matysik J.: „Wprowadzenie do elektroniki i energoelektroniki”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
5. Rosiński A., Dudek E., Krzykowska K., Kasprzyk Z., Stawowy M., Szmigiel A.: Podstawy elektroniki. Laboratorium, 2019, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, ISBN 978-83-7814-991-0, 155 s.
6. Rosiński A., Dudek E., Krzykowska K., Kasprzyk Z., Stawowy M., Szmigiel A.: Elektronika. Laboratorium, 2019, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, ISBN 978-83-7814-992-7, 181 s
7. Tietze U., Schenk C: „Układy półprzewodnikowe”, Wydawnictwa Naukowo Techniczne, 2009.
8. Wawrzyński W.: „Podstawy współczesnej elektroniki”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2003.