



Politechnika Łódzka

Instytut Fizyki

## Laboratorium elektroniki

### Ćwiczenie E10IS

#### Generator przebiegu prostokątnego

## Spis treści:

1. Cel ćwiczenia.....	3
2. Zagrożenia .....	3
3. Wprowadzenie teoretyczne.....	4
4. Dostępna aparatura .....	6
4.1. Moduł doświadczalny.....	6
4.2. Zasilacz laboratoryjny .....	6
4.3. Generator funkcyjny.....	6
4.4. Oscyloskop .....	7
5. Przebieg doświadczenia.....	8
6. Wskazówki do raportu.....	11
7. Literatura .....	12
7.1. Literatura podstawowa .....	12
7.2. Literatura uzupełniająca .....	12
8. Aneksy .....	13
A. Tabele rezystancji i pojemności .....	13

Przed zapoznaniem się z instrukcją i przystąpieniem do wykonywania ćwiczenia należy opanować następujący materiał teoretyczny:

1. Właściwości idealnego i rzeczywistego wzmacniacza operacyjnego, w szczególności parametry opisujące ograniczoną szybkość pracy wzmacniacza oraz wejściowe napięcie niezrównoważenia. [1,2,5,6]
2. Zasada działania generatora przebiegu prostokątnego zrealizowanego jako multiwibrator astabilny przy użyciu wzmacniacza operacyjnego, bramek logicznych oraz elementów dyskretnych. [1,3,5]

## 1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest:

1. Zbadanie właściwości generatora przebiegu prostokątnego.
2. Zapoznanie się z ograniczeniami występującymi w rzeczywistym układzie generatora przebiegu prostokątnego.

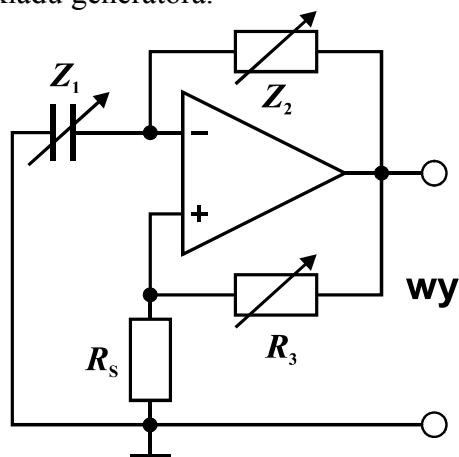
## 2. Zagrożenia

Rodzaj	Brak	Małe	Średnie	Duże
zagrożenie elektryczne		+		
zagrożenie optyczne	+			
zagrożenie mechaniczne (w tym akustyczne, hałas)	+			
zagrożenie polem elektro-magnetycznym (poza widmem optycznym)	+			
zagrożenie biologiczne	+			
zagrożenie radioaktywne (jonizujące)	+			
zagrożenie chemiczne	+			
zagrożenie termiczne (w tym wybuch i pożar)	+			

**Przewody z wtykami bananowymi są przeznaczone wyłącznie do użytku w obwodach niskiego napięcia – nie wolno podłączać ich do gniazda sieci zasilającej 230 V.**

### 3. Wprowadzenie teoretyczne

Rozważmy działanie generatora przedstawionego na rys. 1 zakładając, że zastosowany wzmacniacz operacyjny jest idealny (zestawienie cech idealnego i rzeczywistego wzmacniacza podano m.in. w instrukcji do ćwiczenia E08 „Wzmacniacz operacyjny”). Ponadto założymy, że wzmacniacz operacyjny jest zasilany napięciem symetrycznym  $+U_Z$  oraz  $-U_Z$  względem masy układu generatora.



Rys. 1. Schemat układu generatora przebiegu prostokątnego.

Pętla dodatniego sprzężenia zwrotnego zrealizowana na rezystorach  $R_3$  i  $R_S$  powoduje, że wzmacniacz operacyjny pracuje z histerezą. W stanie stabilnym wyjście takiego układu może znajdować się tylko w stanie nasycenia, tzn. przyjmuje minimalną  $U_{wy,min}$  albo maksymalną  $U_{wy,max}$  możliwą wartość napięcia, która wynika z napięcia zasilania oraz cech konstrukcyjnych wzmacniacza. Załóżmy, że w chwili  $t_0 = 0$  doszło do przełączenia napięcia na wyjściu wzmacniacza z  $U_{wy,min}$  na  $U_{wy,max}$ . Zmiana ta poprzez dzielnik napięcia zrealizowany na rezystorach  $R_3$  i  $R_S$  powoduje przełączenie napięcia na wejściu „+” wzmacniacza z  $U_{we,min}^+$  na  $U_{we,max}^+$ , gdzie

$$U_{we,max}^+ = \frac{R_S}{R_S + R_3} U_{wy,max} \quad (1)$$

$$U_{we,min}^+ = \frac{R_S}{R_S + R_3} U_{wy,min} \quad (2)$$

Zmiana napięcia na wyjściu dociera z opóźnieniem do wejścia „-” wzmacniacza poprzez filtr dolnoprzepustowy RC zrealizowany na kondensatorze  $Z_1$  i rezystorze  $Z_2$ . Gdyby nie następowały kolejne przełączenia stanu na wyjściu wzmacniacza, to napięcie  $u_{we}^-(t)$  na wejściu „-” wzrastałoby asymptotycznie do napięcia nasycenia  $U_{wy,max}$

$$u_{we}^-(t) = U_{wy,max} + [u_{we}^-(0) - U_{wy,max}] e^{-t/(Z_1 Z_2)} \quad (3)$$

Zauważmy, że idealny wzmacniacz operacyjny przełącza się, gdy napięcia na jego wejściach „+” i „-” są równe, zatem napięcie na wejściu „-” w chwili przełączenia  $t = 0$  musi mieć wartość

$$u_{we}^-(0) = U_{we,min}^+ \quad (4)$$

Uwzględniając to w równaniu (3) otrzymujemy

$$u_{we}^-(t) = U_{wy,max} + (U_{we,min}^+ - U_{wy,max}) e^{-t/(Z_1 Z_2)}. \quad (5)$$

Kolejne przełączenie stanu na wyjściu wzmacniacza nastąpi w pewnej chwili  $t = T_1$ , gdy dojdzie do ponownego zrównania się napięć na wejściach wzmacniacza

$$u_{we}^-(T_1) = U_{we,max}^+. \quad (6)$$

Łącząc równania (1), (2), (5) i (6) otrzymujemy związek

$$U_{wy,max} + \left( \frac{R_S}{R_S + R_3} U_{wy,min} - U_{wy,max} \right) e^{-T_1/(Z_1 Z_2)} = \frac{R_S}{R_S + R_3} U_{wy,max}, \quad (7)$$

z którego można wyznaczyć czas trwania stanu wysokiego  $U_{wy,max}$  na wyjściu generatora

$$T_1 = Z_1 Z_2 \ln \left[ 1 + \left( 1 - \frac{U_{wy,min}}{U_{wy,max}} \right) \frac{R_S}{R_3} \right]. \quad (8)$$

Analogicznie jak wyżej można wyprowadzić wzór opisujący czas trwania stanu niskiego  $U_{wy,min}$  na wyjściu generatora

$$T_2 = Z_1 Z_2 \ln \left[ 1 + \left( 1 - \frac{U_{wy,max}}{U_{wy,min}} \right) \frac{R_S}{R_3} \right]. \quad (9)$$

Wzory (8) i (9) wskazują, że asymetria wyjściowych napięć nasycenia wzmacniacza prowadzi do niewielkich odchyłek współczynnika wypełnienia impulsów od 50%. Dla wielu rzeczywistych wzmacniaczy operacyjnych asymetria taka występuje także przy zachowaniu symetrii napięcia zasilającego. Ponadto, wartość ilorazu  $U_{wy,max}/U_{wy,min}$  może ulegać zmianom w funkcji napięcia zasilającego, co przekłada się na niestabilność okresu oscylacji  $T = T_1 + T_2$  i niestabilność współczynnika wypełnienia impulsów  $T_1/(T_1 + T_2)$ .

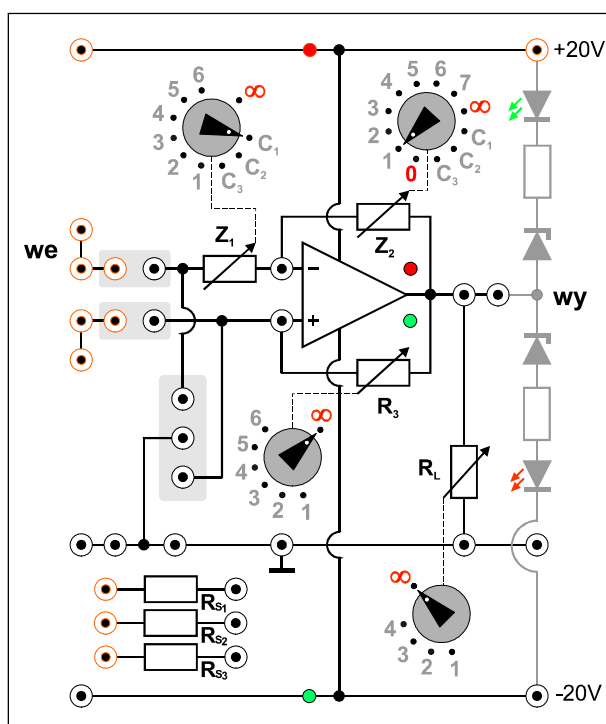
Za najbardziej pożądane do realizacji układu generatora należy uznać specjalne wzmacniacze operacyjne, w których graniczne napięcia wyjściowe są niemal równe napięciom zasilającym (tzw. wzmacniacze „rail to rail”). Jeżeli zapewnione jest symetryczne zasilanie, to w takich wzmacniaczach  $U_{wy,max} = -U_{wy,min}$  i wówczas współczynnik wypełnienia impulsów jest równy 50% a wzór na okres oscylacji generatora upraszcza się do postaci

$$T = T_1 + T_2 = 2Z_1 Z_2 \ln \left( 1 + 2 \frac{R_S}{R_3} \right). \quad (10)$$

## 4. Dostępna aparatura

### 4.1. Moduł doświadczalny

Panel czołowy modułu doświadczalnego przedstawiono na rys. 2. Moduł ten jest złożony ze wzmacniacza operacyjnego oraz zestawów przełączanych elementów R i C, które mogą być podłączone do wejścia „-” wzmacniacza (przełącznik  $Z_1$ ), jako ujemne sprzężenie zwrotne ( $Z_2$ ), jako dodatnie sprzężenie zwrotne ( $R_3$ ), oraz jako obciążenie wyjścia wzmacniacza ( $R_L$ ).



Rys. 2. Panel czołowy modułu doświadczalnego.

### 4.2. Zasilacz laboratoryjny

Symetryczne zasilanie modułu doświadczalnego zrealizowano przy użyciu zasilacza laboratoryjnego SIGLENT SPD3303D [7].

### 4.3. Generator funkcyjny

Generator funkcyjny DF1641B [7], który w tym ćwiczeniu będzie wykorzystywany wyłącznie jako częstotłościomierz przebiegu doprowadzonego z zewnątrz.

#### 4.4. Oscyloskop

W tym ćwiczeniu wykorzystuje się dwukanałowy oscyloskop cyfrowy SIGLENT SDS1052DL [7]. Oscyloskop ten umożliwia zapis oscylogramu do pliku w formacie BMP na zewnętrznej pamięci USB. Zapis odbywa się po każdym naciśnięciu przycisku PRINT a pliki z kolejnymi obrazami otrzymują automatycznie nazwy SDS00001.BMP, SDS00002.BMP,... . Zapis oscylogramu w postaci obrazu ekranu oscyloskopu można wykorzystać zamiast szkicowania oscylogramów. Wykonawcy ćwiczenia, którzy zamierzają skorzystać z tej możliwości, powinni przynieść na zajęcia własną pamięć USB sformatowaną jako FAT/FAT32.

## 5. Przebieg doświadczenia

1. Połączyć obwód zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 3 i 4. Pomiedzy wejście „-” wzmacniacza operacyjnego i masę przyłączyć przewodem kondensator  $C_1$  wybrany przełącznikiem  $Z_1$ , zaś pomiędzy wejście „+” wzmacniacza i masę włączyć rezystor  $R_{S2}$ . Przełącznik  $Z_2$  ustawić w pozycji 1, przełącznik  $R_3$  w pozycji 4, zaś przełącznik  $R_L$  w pozycji  $\infty$ . Do linii zasilania +20 V, -20 V i masy podłączyć zasilacz laboratoryjny, który będzie wykorzystywany do pracy w trybie szeregowym.
2. Do wyjścia badanego układu podłączyć wejście CH1 oscyloskopu cyfrowego. Wykorzystując trójnik BNC albo dodatkowe gniazda na wyjściu badanego układu podłączyć także wejście INPUT częstotliwościomierza wbudowanego w generator funkcyjny.
3. Po uzyskaniu zezwolenia od opiekuna włączyć zasilanie urządzeń. W zasilaczu laboratoryjnym wybrać przyciskiem SER tryb szeregowy, ustawić napięcie 20 V w obu połączonych kanałach i załączyć wyjścia kanałów MASTER i SLAVE. Sprawdzić czy świecą się kontrolki zasilania umieszczona w module doświadczalnym na liniach +20 V i -20 V.
4. W generatorze funkcyjnym przyciskać przycisk w sekcji COUNTER aż do zapalenia wszystkich diod świecących EXT (pomiar częstotliwości sygnału zewnętrznego), ATT ( tłumik 20 dB dla sygnału wejściowego) oraz LPS (filtr dolnoprzepustowy).
5. Przed przystąpieniem do pracy z oscyloskopem cyfrowym zalecane jest naciśnięcie przycisku DEFAULT SETUP w celu przywrócenia domyślnych ustawień oscyloskopu. Następnie ustawić oscyloskop do pracy w trybie jednokanałowym CH1 z czułością 5 V/DIV i poziomem odniesienia 0 V odpowiadającym środkowej poziomej linii na siatce ekranu. Upewnić się, że oscyloskop pracuje w trybie sprzężenia DC (po naciśnięciu przycisku CH1 i rozwinięciu kontekstowego menu przyciskiem MENU ON/OFF poszukać opcji Coupling DC).
6. Dokonać pomiarów minimalnej i maksymalnej wartości napięcia  $U_{wy,min}$  i  $U_{wy,max}$  na wyjściu badanego układu – wartości te można odczytać z ekranu oscyloskopu bezpośrednio w postaci liczbowej po wciśnięciu przycisku MEASURE. Zanotować wyniki i ocenić, czy napięcia te można uznać za symetryczne, co pozwala na stosowanie uproszczonego wzoru (10) w obliczeniach okresu oscylacji. Naszkicować lub zapisać oscylogram wraz z podaniem wartości nastaw oscyloskopu [V/DIV] i [s/DIV].
7. Wykorzystując częstotliwościomierz odczytać częstotliwość  $f$  badanego przebiegu. Wynik pomiaru zanotować w tabeli 1. Kolumna „częstotliwość teoretyczna” w tabeli 1 może pozostać pusta do czasu opracowania raportu.
8. Dokonać pomiarów nachylenia zboczy badanego sygnału przy użyciu oscyloskopu. W tym celu należy rozwinąć przyciskiem TRIG MENU menu ekranowe TRIGGER i wybrać zbocze narastające, następnie rozciągnąć przebieg przy użyciu pokrętła  $s \leftrightarrow ns$  w sekcji HORIZONTAL tak, by jedno wybrane ukośne zbocze przebiegu uzyskało szerokość kilku kratek na ekranie. Użycie pokrętła  $\leftrightarrow$  POSITION może pomóc w ustawieniu dogodnej pozycji zbocza przebiegu względem siatki ekranowej. W menu TRIGGER przełączyć typ zbocza na opadające i wykonać analogiczny pomiar nachylenia dla zbocza opadającego. Wyniki pomiarów zanotować w tabeli 1. Naszkicować lub zapisać odpowiednie oscylogramy.
9. Powtórzyć pomiary opisane w punktach 7 i 8 dla kilkunastu wybranych kombinacji ustawień przełączników  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $R_3$  i rezystancji  $R_S$ . Ustawienia przełącznika  $Z_1$  należy zmieniać w zakresie pozycji  $C_1$  i  $C_2$ , ustawienia przełącznika  $Z_2$  należy zmieniać w zakresie pozycji 1...7 (z wyłączeniem pozycji  $C_1...C_3$  oraz 0 i  $\infty$ ), ustawienia przełącznika

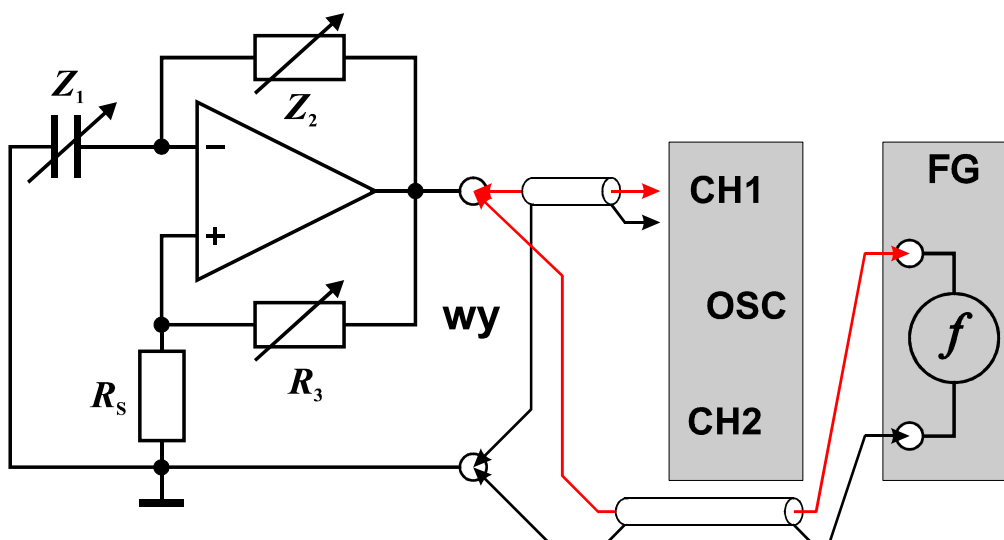


$R_3$  należy zmieniać w zakresie pozycji 1...6 a rezystancję  $R_S$  należy wybierać pomiędzy wariantami  $R_{S1}$  i  $R_{S2}$ . Ilość rejestrowanych oscylogramów można ograniczyć do udokumentowania tylko charakterystycznych przebiegów bez powtórzeń, w tym co najmniej jednego dla zbocza narastającego i jednego dla zbocza opadającego.

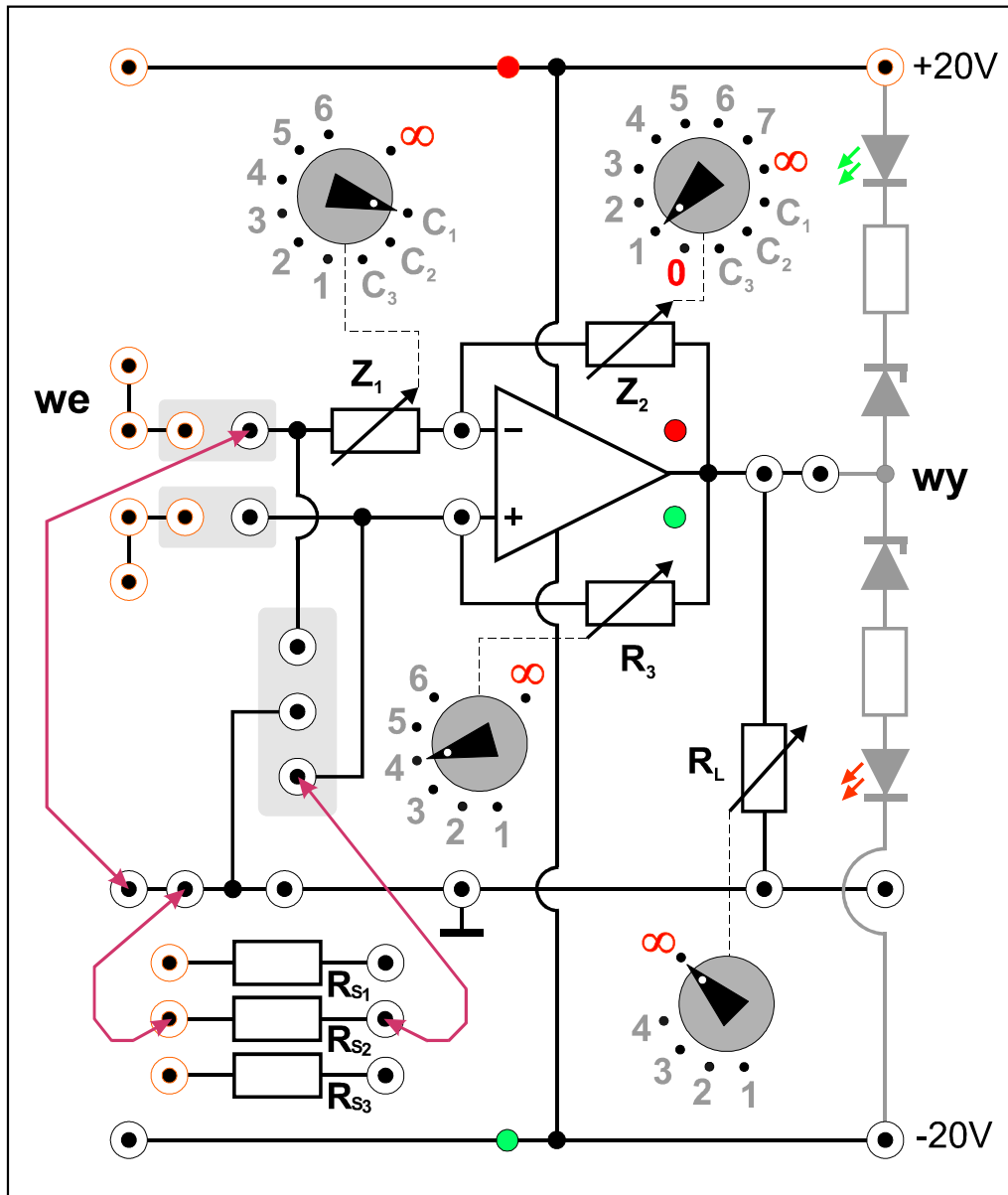
10. Wyłączyć zasilanie i rozłączyć układ.

Nastawy układu				Częstotliwość zmierzona	Częstotliwość teoretyczna	Nachylenie zbocza [V/ $\mu$ s]	
$Z_1$ [ $\mu$ F]	$Z_2$ [k $\Omega$ ]	$R_3$ [k $\Omega$ ]	$R_S$ [k $\Omega$ ]	$f$ [Hz]	$f_t$ [Hz]	narastającego	opadającego

Tabela 1. Tabela pomiarów dla generatora drgań prostokątnych.



Rys. 3. Schemat układu do badań generatora drgań prostokątnych.



Rys. 4. Układ połączeń generatora przebiegu prostokątnego na module doświadczalnym.

## 6. Wskazówki do raportu

Raport powinien zawierać:

1. Stronę tytułową (wg wzoru).
2. Sformułowanie celu ćwiczenia.
3. Wykaz użytej aparatury (numery inwentarzowe, modele urządzeń i wykorzystywane nastawy).
4. Schemat układu pomiarowego.
5. Stabelaryzowane wyniki pomiarów, obserwacji i obliczeń oraz wzory użyte w obliczeniach (bez wyprowadzeń). W szczególności należy obliczyć teoretyczną częstotliwość generatora drgań prostokątnych  $f_t$  jako odwrotność teoretycznego okresu oscylacji  $T$  danego wzorem (10). W przypadku, gdy ujemne i dodatnie napięcia nasycenia na wyjściu wzmacniacza nie spełniają przybliżonego związku  $U_{wy,min} \approx -U_{wy,max}$  okres oscylacji obliczyć jako sumę czasów trwania stanu wysokiego i niskiego  $T_1 + T_2$  według wzorów (8) i (9).
6. Wykresy oscylogramów i analizę wyników. W szczególności należy zamieścić przykładowe oscylogramy dla wyjścia generatora przebiegu prostokątnego z opisami nastaw oscyloskopu oraz elementów RC w generatorze. Porównać eksperymentalne i teoretyczne wartości częstotliwości oscylacji generatora. Podjąć próbę stwierdzenia czy ewentualne rozbieżności wartości częstotliwości zmierzonych i wyznaczonych teoretycznie wykazują jakiś związek z wartościami elementów  $R$  i  $C$  w badanym układzie. Czy rozbieżności dla niektórych nastaw rezystancji i pojemności można ocenić jako błędy grube, jeżeli wiadomo, że dopuszczalna tolerancja dla pojemności kondensatorów wynosi  $\pm 10\%$  zaś dla rezystancji oporników  $\pm 5\%$ ? Porównać szybkości narastania i opadania zbocza przy różnych nastawach i stwierdzić czy zależą one od bieżących nastaw elementów  $R$  i  $C$  w układzie badanego generatora, czy raczej szybkości te są cechą charakterystyczną układu wzmacniacza operacyjnego. Jeżeli obsługa pracowni nie podała inaczej przyjąć, że zastosowano wzmacniacz operacyjny typu OP07 i porównać zmierzone wartości nachylenia zboczy z danymi odczytanymi z karty katalogowej wzmacniacza.
7. Uwagi końcowe i wnioski.

W raporcie ocenie podlegać będzie obecność i poprawność wszystkich wymienionych powyżej składników, czytelność prezentacji wyników w postaci tabel, wyników obliczeń, oscylogramów i odczytów z oscylogramów wraz z opisami oraz jakość sformułowanych wniosków. Wstęp teoretyczny nie jest wymagany i w przypadku jego zamieszczenia w raporcie nie wpłynie na ocenę.

## 7. Literatura

### 7.1. Literatura podstawowa

- [1] A. Chwaleba, B. Moeschke, „Pracownia elektroniczna. Część 2, układy elektroniczne”, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1980.
- [2] Stanisław Kuta, „Elementy i układy elektroniczne. Część 1”, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne Akademii Górniczo-Hutniczej, Kraków 2000.
- [3] B. Moeschke, G. Płoszajski, „Elektronika”, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1988.
- [4] Z. Kulka, M. Nadachowski, „Liniowe układy scalone i ich zastosowanie”, WKiŁ, Warszawa 1977.
- [5] P. Górecki, „Wzmacniacze operacyjne”, BTC, Warszawa 2004.
- [6] M. Łakomy, J. Zabrodzki, „Liniowe układy scalone w technice cyfrowej”, PWN, Warszawa 1987.

### 7.2. Literatura uzupełniająca

- [7] Instrukcje obsługi do multimetrów, zasilacza laboratoryjnego, generatora funkcyjnego i oscyloskopu dostępne są na stronie internetowej:  
<https://fizyka.p.lodz.pl/pl/dla-studentow/informatyka/podstawy-elektroniki-laboratorium/zasoby/>

## Aneksy

### A. Tabele rezystancji i pojemności

$Z_1$	
Pozycja	Wartość
1	5 k $\Omega$
2	10 k $\Omega$
3	15 k $\Omega$
4	20 k $\Omega$
5	25 k $\Omega$
6	30 k $\Omega$
$\infty$	$\infty \Omega$
$C_1$	0,1 $\mu$ F
$C_2$	1,0 $\mu$ F
$C_3$	10 $\mu$ F

$Z_2$	
Pozycja	Wartość
0	0 k $\Omega$
1	10 k $\Omega$
2	20 k $\Omega$
3	50 k $\Omega$
4	100 k $\Omega$
5	200 k $\Omega$
6	500 k $\Omega$
7	1 M $\Omega$
$\infty$	$\infty \Omega$
$C_1$	0,1 $\mu$ F
$C_2$	1,0 $\mu$ F
$C_3$	10 $\mu$ F

$R_3$	
Pozycja	Wartość
1	20 k $\Omega$
2	50 k $\Omega$
3	100 k $\Omega$
4	200 k $\Omega$
5	500 k $\Omega$
6	1 M $\Omega$
$\infty$	$\infty \Omega$

$R_L$	
Pozycja	Wartość
1	2 k $\Omega$
2	5 k $\Omega$
3	10 k $\Omega$
4	20 k $\Omega$
$\infty$	$\infty \Omega$

$R_S$	
Rezystor	Wartość
$R_{S1}$	10 k $\Omega$
$R_{S2}$	300 k $\Omega$
$R_{S3}$	10 M $\Omega$