

Generator relaksacyjny ze wzmacniaczami operacyjnymi

B. Hadała, H. Makara, D. Bajołek

I. WPROWADZENIE

GENERATORY relaksacyjne oparte na wzmacniaczach operacyjnych stanowią istotny element układów generujących sygnały okresowe, takich jak generatory przebiegów prostokątnych, trójkątnych czy piłokształtnych. Ich zastosowania obejmują szeroki zakres dziedzin, od prostych układów testowych po zaawansowane systemy pomiarowe i sterujące. W artykule przedstawiono projekt wzmacniacza relaksacyjnego zrealizowanego z użyciem wzmacniacza operacyjnego, ze szczególnym uwzględnieniem teoretycznych podstaw działania układu, ograniczeń wynikających z parametrów zastosowanych elementów oraz wpływu niedoskonałości rzeczywistych komponentów na pracę generatora. W części teoretycznej omówiono przyjęte założenia projektowe oraz porównano różne możliwe rozwiązania układów relaksacyjnych. Dalsza część artykułu zawiera wyniki symulacji komputerowych przeprowadzonych w celu analizy działania układu, w tym wpływu rozrzutu wartości komponentów oraz parametrów nieidealnych wzmacniacza operacyjnego, takich jak napięcie offsetowe czy prąd polaryzacji wejść. Symulacje pozwalają na ocenę stabilności generowanego sygnału oraz identyfikację potencjalnych problemów w pracy układu. Artykuł zamyka podsumowanie, w którym przedstawiono wnioski z analizy teoretycznej i symulacyjnej, a także wyniki weryfikacji działania rzeczywistego układu zbudowanego i przetestowanego w warunkach laboratoryjnych.

II. ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE I ICH PORÓWNANIE

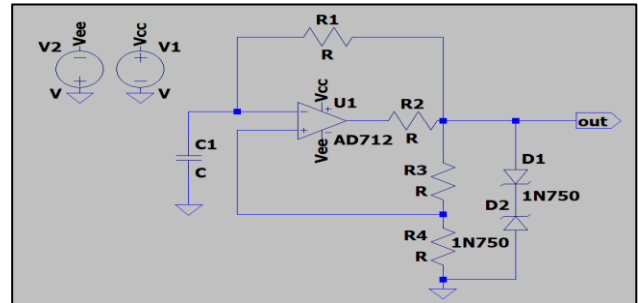
Celem projektu jest zaprojektowanie generatora relaksacyjnego z wykorzystaniem wzmacniacza operacyjnego, generującego sygnał prostokątny o określonych parametrach:

- częstotliwość generowanego sygnału: **1 Hz**
- amplituda wyjściowa: **6.5 V**
- zasilanie układu: **10 V**
- optyczna sygnalizacja generowanego sygnału przy użyciu diody LED
- stabilność generowanego sygnału: minimalny wpływ tolerancji elementów i parametrów wzmacniacza operacyjnego
- możliwość weryfikacji symulacyjnej i praktycznej
- prostota układu: minimalna liczba elementów, niski koszt oraz łatwość budowy

Porównanie możliwych realizacji:

1. Klasyczny generator relaksacyjny z histerezą:

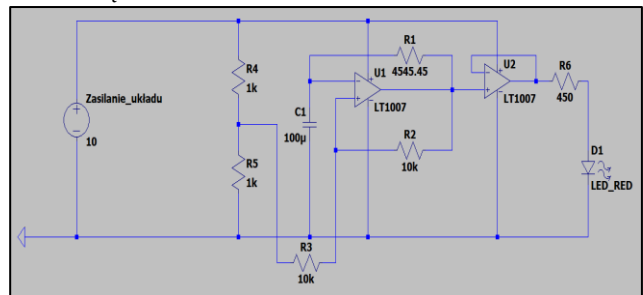
- Wrażliwość na parametry wzmacniacza operacyjnego
- Łatwo przewidywalna częstotliwość generacji
- Prosta struktura oparta na wzmacniaczu operacyjnym, rezystorach i kondensatorze



Rys. 1. Schemat generatora relaksacyjnego z histerezą

2. Generator relaksacyjny z dwoma wzmacniaczami operacyjnymi – układ astabilny:

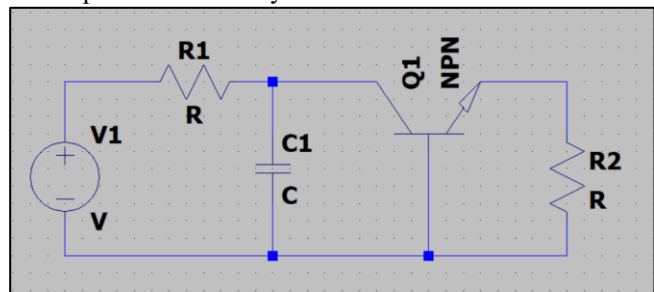
- Potencjalnie lepsza stabilność układu
- Większa złożoność układu



Rys. 2. Schemat generatora relaksacyjnego z dwoma wzmacniaczami operacyjnymi

3. Generator z układem RC i tranzystorem

- Niższa precyzja
- Mniejsza odporność na zmiany temperatury i parametrów tranzystora



Rys. 3. Schemat generatora RC z tranzystorem

Po przeanalizowaniu powyższych rozwiązań wybrano wariant z *dwoma wzmacniaczami operacyjnymi*. Układ w tej konfiguracji pozwala na precyzyjniejsze sterowanie parametrami pracy generatora, zapewnia większą odporność na wpływ niedoskonałości rzeczywistych komponentów, takich jak tolerancje elementów pasywnych czy parametry wzmacniacza operacyjnego, oraz ułatwia analizę teoretyczną i symulacyjną działania układu. W projekcie założono zasilanie układu z źródła napięcia o wartości ± 10 V, co pozwala na łatwą kontrolę napięć zasilających. Nie rozważano zasilania z przetwornicy ani stabilizatora napięcia, ponieważ ich wpływ na działanie układu nie jest przedmiotem analizy tego projektu.

III. ZASADA DZIAŁANIA

W obwodzie można wyróżnić dwa charakterystyczne cykle pracy: cykl ładowania oraz cykl rozładowywania kondensatora. W celu lepszego zrozumienia działania układu, każdy z tych cykli zostanie przeanalizowany osobno.

Cykl ładowania kondensatora:

Z idealnego źródła zasilania dostarczane jest napięcie, które następnie jest doprowadzone do dzielnika napięcia zbudowanego z dwóch rezystorów o jednakowych wartościach R_4 i R_5 . Dzielnik ten generuje na swoim wyjściu napięcie równe połowie wartości napięcia zasilającego, co umożliwi uzyskanie symetrycznego punktu odniesienia dla dalszych części układu.

$$V_{ref} = \frac{R_5}{R_4 + R_5} \cdot V_{in} \quad (1)$$

w przypadku $R_4 = R_5$:

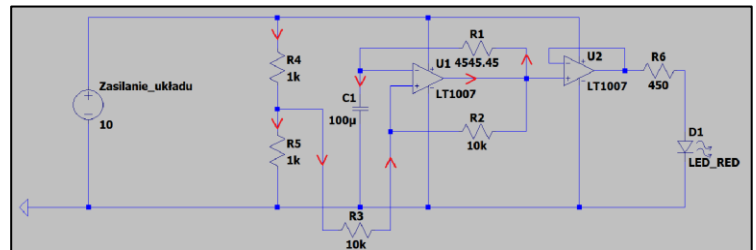
$$V_{ref} = \frac{1}{2} \cdot V_{in} \quad (2)$$

Nieodpowiedni dobór rezystorów R_4 i R_5 w dzielniku napięcia odniesienia może mieć istotny wpływ na poprawne działanie układu. W skrajnym przypadku może dojść do sytuacji, w której generator przestaje generować przebiegi okresowe, a układ przechodzi w stan statyczny, napięcie na wyjściu stabilizuje się. W efekcie LED zamiast migotać, będzie świecił światłem ciągłym lub pozostanie zgaszona.

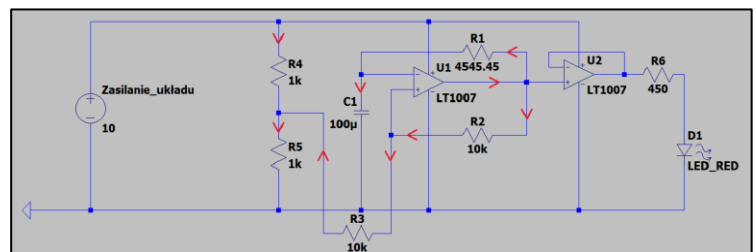
W przypadku zasilania układu napięciem 10 V, należy również uwzględnić ograniczenia wyjściowe wzmacniacza operacyjnego LM358. Maksymalne napięcie wyjściowe układu wynosi około 8 V, natomiast minimalne napięcie wyjściowe jest ograniczone do wartości rzędu 0.6–0.7 V.

Zbyt wysokie lub zbyt niskie wartości rezystorów R_4 i R_5 mogą prowadzić do sytuacji, w której napięcie na kondensatorze nie osiąga wymaganych poziomów, na przykład napięcie ładowania nie przekroczy 8 V, a napięcie rozładowania nie spadnie poniżej 0.6 V. Takie zjawiska mogą uniemożliwić prawidłową zmianę się stanów układu, co prowadzi do zaniku generacji sygnału okresowego.

Kondensator C_1 jest połączony bezpośrednio z wejściem odwracającym wzmacniacza operacyjnego LM358 (nóżka nr 2). W momencie załączenia napięcia zasilającego, kondensator C_1 jest rozładowany, a jego napięcie początkowe wynosi blisko 0 V. Równocześnie napięcie na wejściu nieodwracającym (nóżka nr 3) jest ustalone przez dzielnik rezystorowy R_4 i R_5 i przyjmuje wartość około połowy napięcia zasilającego, tj. około 5 V, jednak ze względu na obecność rezystora R_3 połączonego między dzielnikiem a wejściem nieodwracającym, napięcie to wzrasta dynamicznie wraz ze zmianą stanu wyjścia wzmacniacza i stabilizuje się na poziomie około 6.7 V. Po załączeniu zasilania napięcie wyjściowe wzmacniacza operacyjnego (nóżka nr 1) gwałtownie wzrasta, osiągając wartość bliską maksymalnemu napięciu wyjściowemu układu, czyli około 8 V. W rezultacie przez rezystor R_1 zaczyna płynąć prąd ładowania kondensatora C_1 . Jednocześnie, ze względu na sprzężenie zwrotne poprzez rezystory R_2 , R_3 i R_5 , napięcie na wejściu nieodwracającym również stopniowo wzrasta. Jest to efektem przepływu prądu z wyjścia wzmacniacza operacyjnego, który poprzez wymienione rezystory zamyka się w kierunku masy układu. Proces ładowania kondensatora C_1 trwa do momentu, w którym napięcie na jego okładkach przekroczy napięcie na wejściu nieodwracającym wzmacniacza operacyjnego. Po osiągnięciu tego punktu następuje zmiana stanu wyjścia układu i rozpoczęcie kolejnego cyklu pracy.



Rys. 4. Rozpływ prądów ładowania kondensatora C_1



Rys. 5. Rozpływ prądów dodatniego sprzężenia zwrotnego

Cykl rozładowywania kondensatora:

Po zakończeniu cyklu ładowania kondensatora C_1 , na wyjściu wzmacniacza operacyjnego LM358 ustala się napięcie na poziomie około 0.6 V. Wartość ta wynika z ograniczeń strukturalnych układu, a dokładniej ze spadku napięcia na wewnętrznym tranzystorze wyjściowym wzmacniacza. W tym momencie rozpoczyna się proces rozładowywania kondensatora C_1 , który odbywa się poprzez rezystor R_1 oraz wewnętrzny tranzystor wyjściowy układu LM358. W trakcie cyklu rozładowywania prąd płynie z kondensatora C_1 przez rezystor R_1

do masy układu. Jednocześnie napięcie na wejściu nieodwracającym wzmacniacza wzrasta i stabilizuje się na poziomie około 2.6 V. Zjawisko to jest efektem pojawienia się prądu dodatniego sprzężenia zwrotnego, płynącego z dzielnika rezystorowego R_2 , R_3 w kierunku ujemnej szyny zasilania. Przełączenie stanu wyjścia układu oraz zmiana kierunku przepływu prądu powoduje, że po osiągnięciu przez napięcie na wejściu odwracającym wartości niższej niż 2,6 V, rozpoczyna się ponowny cykl ładowania kondensatora C_1 . Zmiana stanu układu inicjuje nowy rozkład prądów w obwodzie.

Wtórnik napięciowy:

Wzmacniacz LM358 zawiera dwa niezależne wzmacniacze operacyjne. W niniejszym projekcie drugi wzmacniacz operacyjny został wykorzystany jako wtórnik napięciowy w celu uniezależnienia działania generatora od obciążenia podłączonego do jego wyjścia. Wtórnik napięciowy charakteryzuje się wysoką impedancją wejściową, co oznacza, że praktycznie nie pobiera prądu z poprzedzającego stopnia, oraz niską impedancją wyjściową, co pozwala na dostarczanie większych prądów do obciążenia bez istotnego spadku napięcia na wyjściu — umożliwiając tym samym bezpośrednie zasilanie diody LED. Wyjście wtórnika jest sprzężone z wejściem odwracającym, tworząc konfigurację bufora napięciowego, dzięki czemu na wyjściu uzyskuje się sygnał o takim samym kształcie i wartości, jak na wejściu układu podłączonego do generatora.

Rezystory R_2 i R_3 :

Aby zapewnić stabilne napięcie na wejściu nieodwracającym, zaleca się stosowanie rezystorów o wartości około 10 k Ω . Dobór tych rezystorów wpływa bezpośrednio na progi napięć, przy których następuje zmiana stanu wyjścia układu, co ma kluczowe znaczenie dla prawidłowego działania generatora.

Rezystory R_4 i R_5 :

Rezystory muszą być dobrane w taki sposób, aby niewielki prąd obciążający dzielnik nie powodował zmian napięcia na jego wyjściu. Przyjmujemy, więc że prąd płynący przez dzielnik jest dziesięciokrotnie mniejszy od prądu jaki jest pobierany przez obwód wzmacniacza.

$$I_{\max(R_2+R_3)} = \frac{U_{zas}}{R_3+R_2} = \frac{10 [V]}{10k+10k [\Omega]} = 500 \mu A \quad (3)$$

$$I_{\text{dzielnika}} = 10 I_{\max(R_2+R_3)} = 5 mA \quad (4)$$

$$R_{\text{dzielnika}} = \frac{U_{zas}}{I_{\text{dzielnika}}} = \frac{10}{5m} = 2 k\Omega \quad (5)$$

$$R_4 = R_5 = 1 k\Omega$$

Rezystor R_1 :

Celem projektu jest zaprojektowanie generatora relaksacyjnego o częstotliwości wyjściowej około 1 Hz. W układzie zastosowano kondensator C_1 o pojemności 100 μF .

$$R_1 = \frac{1}{2.2 \cdot f \cdot C} = \frac{1}{2.2 \cdot 1 \cdot 100\mu} = 4545.45 \Omega \quad (6)$$

W układzie zastosowano potencjometr w celu uzyskania nietypowej wartości rezystancji, która nie występuje w standardowych szeregach wartości rezystorów. Użycie potencjometru umożliwia precyzyjne dostrojenie rezystancji do wymaganej wartości, co jest szczególnie istotne dla prawidłowego działania układu oraz optymalizacji jego parametrów.

Matematycznie czas potrzebny do przejścia napięcia kondensatora między progami wyznacza zależność:

$$V_c(t) = V_{final} + (V_{initial} - V_{final}) \cdot e^{\frac{-t}{R_1 C_1}} \quad (7)$$

Próg przełączania nie zachodzi w połowie napięcia zasilania, jak w układach z idealnym symetrycznym dzielnikiem, ale bliżej 60-70% napięcia zasilania, co wynika z charakterystyki wzmacniacza. W praktyce, ze względu na *ograniczenia napięcia wyjściowego wzmacniacza, straty na elementach nieliniowych wewnątrz wzmacniacza, asymetrię napięcia przełączeń i slew rate wzmacniacza* czas ładowania i rozładowywania nie jest równy $RC \cdot \ln(2)$, ale dłuższy. Dlatego przyjmuje się empiryczny współczynnik 2.2, który lepiej oddaje rzeczywistą dynamikę pracy układu.

Rezystor R_6 :

Aby zapewnić poprawną pracę LED w układzie generatora oraz zabezpieczyć ją przed uszkodzeniem w wyniku nadmiernego prądu, konieczne jest zastosowanie rezystora szeregowego R_6 , który ogranicza wartość prądu przewodzenia płynącego przez diodę. Dobór rezystora należy przeprowadzić w oparciu o parametry LED oraz napięcie wyjściowe wzmacniacza operacyjnego zasilającego diodę. Zgodnie z charakterystyką LED, dla uzyskania odpowiedniego poziomu jasności przy jednoczesnym zachowaniu bezpiecznych warunków pracy, zaleca się ustalenie prądu przewodzenia I_{D1} na poziomie zgodnym z wartością nominalną określoną w dokumentacji diody typowo 20 mA. Należy również uwzględnić wartość napięcia przewodzenia diody V_{D1} , które zależy od jej rodzaju, w naszym wypadku wynosi 2 V.

$$R_6 = \frac{U_{zas} - V_{D1}}{I_{D1}} = \frac{8-2 [V]}{20m [A]} = 300 \Omega \quad (8)$$

$$R_6 \geq 300 \Omega \quad (9)$$

V. WZMACNIACZ LM358

W projekcie generatora przebiegów okresowych wykorzystano wzmacniacz operacyjny LM358, który zawiera dwa niezależne wzmacniacze w jednej obudowie. Zastosowanie LM358 pozwala na realizację zarówno głównego bloku generującego sygnał, jak i dodatkowego stopnia wtórnika napięciowego, co znacząco upraszcza konstrukcję układu.

5.1. Ogólna specyfikacja i opis układu:

LM358 to popularny, dwukanałowy wzmacniacz operacyjny pracujący w technologii bipolarnych tranzystorów. Może być zasilany napięciem pojedynczym lub symetrycznym w zakresie od 3 V do 32 V. Układ charakteryzuje się stosunkowo niskim poborem prądu, co umożliwia jego szerokie zastosowanie w systemach niskomocowych

5.2. Parametry istotne w projekcie:

5.2.1 *Zakres napięć wyjściowych* - przy zasilaniu napięciem 10 V, napięcie wyjściowe może osiągnąć maksymalnie około 8 V, natomiast minimalne napięcie wyjściowe wynosi około 0,6–0,7 V. Ograniczenia te wynikają z wewnętrznej konstrukcji tranzystorów wyjściowych

5.2.2 *Prąd wyjściowy* - LM358 może dostarczyć prąd wyjściowy rzędu 20–40 mA, co umożliwia zasilanie diody LED bezpośrednio z wyjścia wzmacniacza

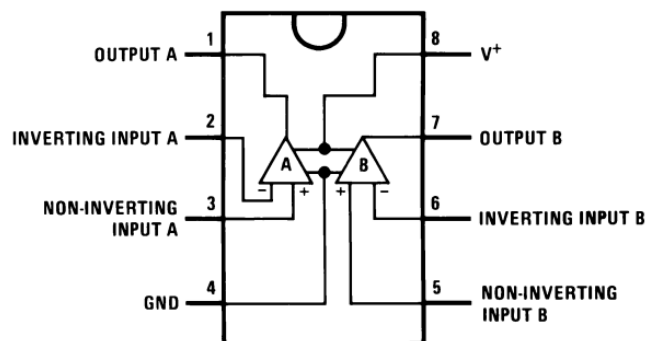
5.2.3 *Prąd polaryzacji wejściowej* - typowa wartość wynosi 45 nA, co może wpływać na napięcia progowe w układach komparatorowych

5.2.4 *Napięcie offsetowe* - typowa wartość wynosi 2 mV, co również wprowadza niewielkie przesunięcie w napięciach przełączania.

5.2.5 *Slew rate* - około $0,5 \frac{V}{\mu s}$ - ogranicza maksymalną częstotliwość pracy generatora, co jest istotne przy wyższych częstotliwościach.

5.3. Uzasadnienie wyboru LM358:

Wybór LM358 do realizacji projektu był podyktowany jego dostępnością, niskim kosztem, możliwością pracy przy zasilaniu pojedynczym oraz obecnością dwóch wzmacniaczy operacyjnych w jednej obudowie, co pozwoliło na budowę zarówno głównego układu generatora, jak i wtórnika napięciowego. Pomimo pewnych ograniczeń, układ LM358 jest wystarczający do realizacji generatora sygnału prostokątnego o niskiej częstotliwości oraz do zasilania diody LED bezpośrednio z wyjścia wzmacniacza.



Rys. 6. Schemat połączeń układu LM358

VI. OGRANICZENIA UKŁADU

Mimo prostoty konstrukcji i satysfakcjonujących wyników działania, zaprojektowany generator relaksacyjny oparty na dwóch wzmacniaczach operacyjnych LM358 posiada pewne istotne ograniczenia, które należy uwzględnić podczas analizy jego pracy i zastosowań.

6.1. Ograniczenia wynikające z parametrów wzmacniacza operacyjnego:

6.1.1 Ograniczony zakres napięć wyjściowych - wyjście wzmacniacza LM358 nie osiąga pełnego zakresu napięcia zasilania. Przy zasilaniu 10 V, napięcie wyjściowe ogranicza się do około 0,6–0,7 V i maksymalnie 8 V. To zjawisko wpływa na zakres napięć ładowania i rozładowywania kondensatora C_1 , a tym samym na dokładność i kształt generowanego przebiegu.

6.1.2 Napięcie offsetowe i prąd polaryzacji wejściowej - obecność napięcia offsetowego rzędu kilku mV oraz prądów polaryzacji wejściowej powoduje przesunięcie progów przełączania komparatora, co wpływa na częstotliwość pracy oraz symetrię generowanego sygnału. W praktyce może to prowadzić do niewielkich odchyłek częstotliwości od wartości projektowej.

6.1.3 Ograniczona prędkość narastania sygnału - LM358 posiada stosunkowo niską prędkość narastania sygnału $0,5 \frac{V}{\mu s}$, co ogranicza maksymalną częstotliwość pracy układu.

Dla zastosowanej częstotliwości 1 Hz to ograniczenie nie jest krytyczne, jednak przy wyższych częstotliwościach może prowadzić do zniekształceń przebiegu prostokątnego.

6.2. Ograniczenia wynikające z zastosowanych elementów pasywnych:

6.2.1 Tolerancje elementów pasywnych - wartości rezystorów i kondensatorów zastosowanych w układzie posiadają określone tolerancje, co wpływa na dokładność częstotliwości generowanego sygnału.

6.2.2 Wahania napięcia zasilania - układ generatora nie posiada układów kompensujących zmiany napięcia zasilania. Wahania napięcia zasilającego wpływają bezpośrednio na wartości napięć progowych i częstotliwość generowanego przebiegu.

6.3. Ograniczenia funkcjonalne układu:

6.3.1 Brak stabilizacji termicznej - parametry układu mogą zmieniać się pod wpływem temperatury, co może prowadzić do nieznacznych odchyłek częstotliwości pracy.

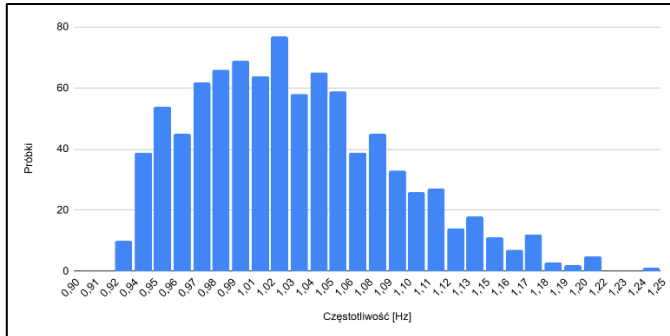
6.3.2 Brak ochrony przeciwzwarciowej - wzmacniacz LM358 nie posiada wewnętrznej ochrony przed zwarcieniem na wyjściu, co może prowadzić do uszkodzenia układu w przypadku nieprawidłowego podłączenia obciążenia.

VII. SYMULACJA

7.1 Analiza tolerancji

W projektowaniu systemu należy uwzględnić parametryczne ograniczenie tolerancji, aby zapewnić pomyślny

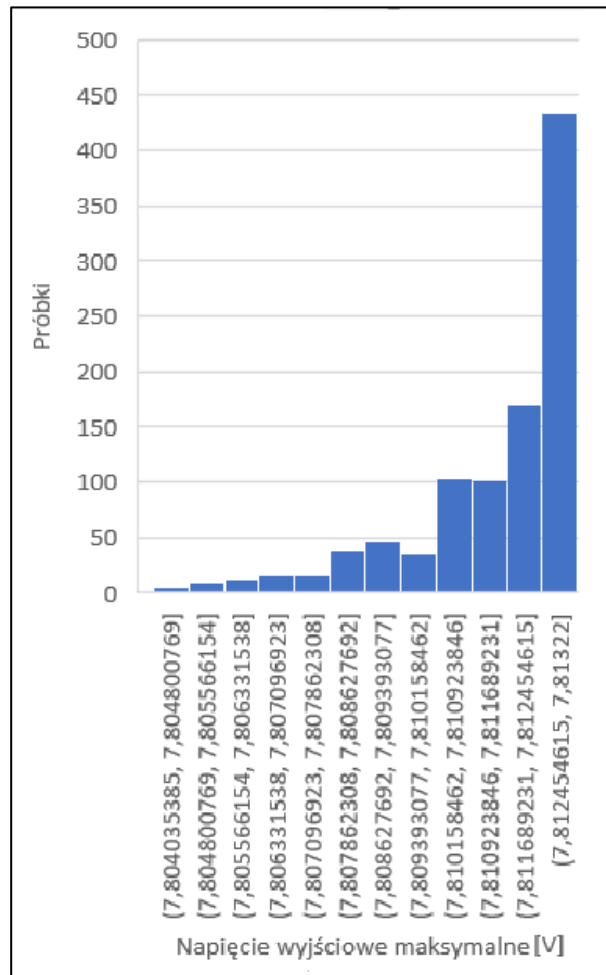
projekt. Typowe podejście wykorzystuje analizę najgorszego przypadku (WCA), w której wszystkie parametry są dostosowywane do ich maksymalnego limitu tolerancji. Alternatywnym podejściem do analizy tolerancji systemu jest użycie narzędzi statystycznych do analizy tolerancji komponentów. Korzyścią analizy statystycznej jest to, że uzyskane dane mają rozkład, który odzwierciedla to, co powinno być powszechnie mierzone w systemach fizycznych. W tym projekcie oprogramowanie *LTSpice* jest używane do symulacji wydajności obwodu z rozkładem Monte Carlo do zmienności tolerancji parametrycznej. Jest to porównywane z symulacją WCA.



Rys. 7. Wpływ tolerancji elementów na częstotliwość – histogram (Monte Carlo, 1% niepewności, 1000 symulacji)

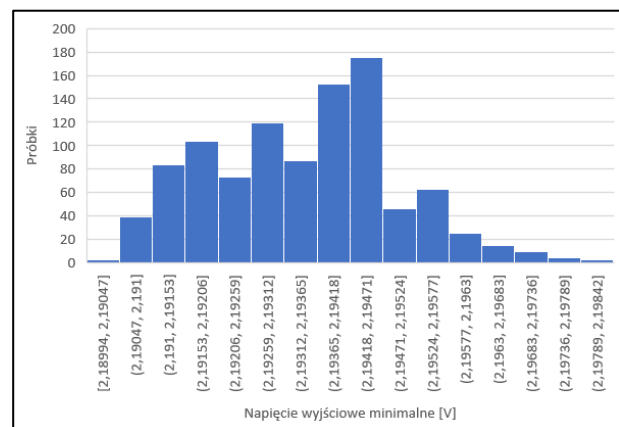
Średnia wartość	1.03 Hz
Minimum	0.93 Hz
Maksimum	1.25 Hz
Mediana	1.02 Hz
Odchylenie standardowe	0.059

Przeprowadzona analiza Monte Carlo dla 1000 realizacji układu przy założeniu tolerancji elementów pasywnych równej 1% wykazała, że większość wyników skupia się wokół częstotliwości 1.02 Hz. Zakres wyników rozciąga się od 0.93 Hz do 1.25 Hz, co wskazuje na umiarkowany rozrzut wartości wyjściowej w stosunku do oczekiwanej częstotliwości 1 Hz. Tego typu odchylenia są typowe dla układów analogowych bazujących na elementach dyskretnych o standardowej tolerancji, a uzyskany wynik można uznać za **akceptowalny** w przypadku mniej krytycznych zastosowań, takich jak proste sygnalizatory, układy testowe czy nisko kosztowe generatory. Jednocześnie wyniki analizy podkreślają istotną **zależność parametrów pracy od dokładności elementów pasywnych**, a także konieczność uwzględniania wpływu tolerancji w procesie projektowania, zwłaszcza w aplikacjach wymagających wysokiej stabilności częstotliwości, takich jak systemy zegarowe czy precyzyjne układy pomiarowe.



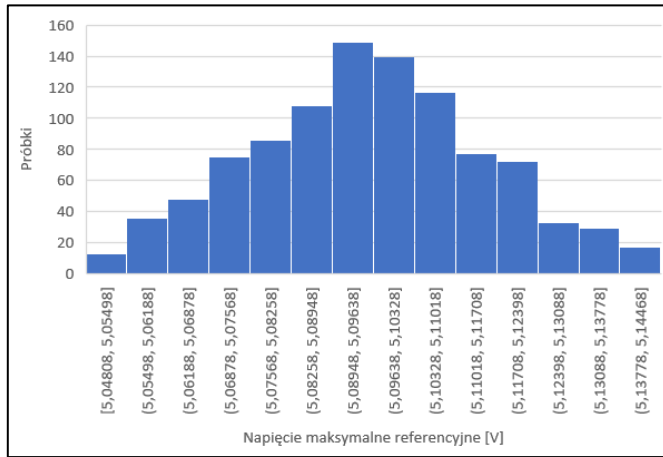
Rys. 8. Wpływ tolerancji elementów na maksymalne napięcie wyjściowe – histogram (Monte Carlo, 1% niepewności, 1000 symulacji)

Średnia wartość	7.811 V
Minimum	7.793 V
Maksimum	7.813 V
Mediana	7.812 V
Odchylenie standardowe	0.0022



Rys. 9. Wpływ tolerancji elementów na minimalne napięcie wyjściowe – histogram (Monte Carlo, 1% niepewności, 1000 symulacji)

Średnia wartość	2,193 V
Minimum	2,189 V
Maksimum	2,198 V
Mediana	2,193 V
Odchylenie standardowe	0.0022



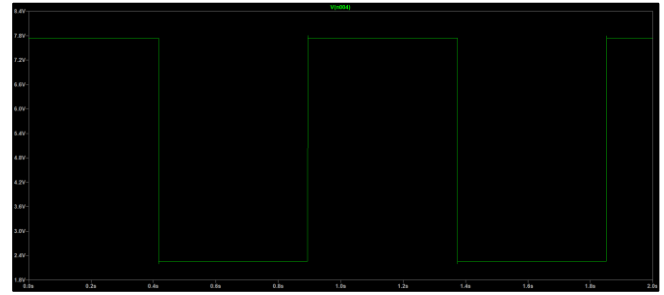
Rys. 10. Wpływ tolerancji elementów na maksymalne napięcie referencyjne – histogram (Monte Carlo, 1% niepewności, 1000 symulacji)

Średnia wartość	5,095 V
Minimum	5,048 V
Maksimum	5,143 V
Mediana	5,095 V
Odchylenie standardowe	0,019

Przeprowadzone obliczenia wartości minimalnych i maksymalnych napięć wyjściowych w analizie Monte Carlo wykazały, że uzyskane wartości są bardzo zbliżone, odchylenie standardowe pozostaje na niskim poziomie. Oznacza to, że w analizowanym układzie tolerancje elementów (1%) nie mają istotnego wpływu na wartości napięć wyjściowych. W praktyce pozwala to przyjąć, że układ charakteryzuje się wysoką stabilnością napięciową, co jest korzystne z punktu widzenia niezawodności i powtarzalności pracy generatora. Wyniki potwierdzają, że w przypadku analizowanego schematu wpływ rozrzutu parametrów elementów pasywnych na napięcie wyjściowe jest marginalny. Dodatkowo przeprowadzona analiza napięcia odniesienia V_{ref} potwierdziła jego wysoką stabilność. Niewielkie odchylenia potwierdzają, że układ zapewnia pewną i przewidywalną wartość napięcia odniesienia, co jest istotne w kontekście poprawnej pracy całego generatora. Stabilność napięcia odniesienia bezpośrednio przekłada się na stabilność generowanej częstotliwości, co stanowi kluczowy parametr z punktu widzenia funkcjonalności układu.

7.2 Wyniki analizy przebiegów w programie LTSpice

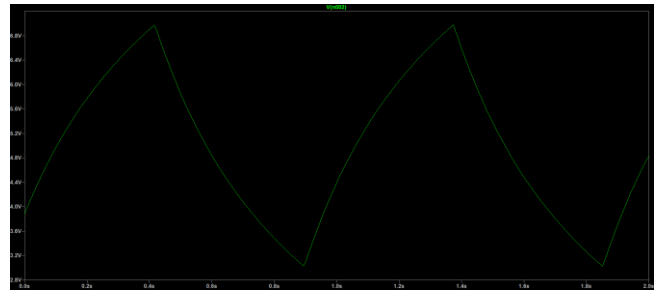
7.2.1 Przebieg wyjściowy generatora



Rys. 11. Przebieg napięcia wyjściowego generatora

Przeprowadzona symulacja układu generatora opartego na wzmacniaczu operacyjnym LM358 wykazała, że napięcie wyjściowe zmienia się w zakresie od wartości minimalnej **2,2597 V** do wartości maksymalnej **7,7403 V**. Przebieg charakteryzuje się kształtem fali prostokątnej, z wyraźnie zaznaczonymi poziomami napięcia wysokiego i niskiego. Zmierzona częstotliwość generowanego sygnału wynosi **1,0456 Hz**, co odpowiada założonym parametrom projektowym w zakresie tolerancji elementów układu. Wyniki te potwierdzają prawidłową pracę układu jako generatora przebiegu prostokątnego oraz zgodność z założeniami teoretycznymi przyjętymi w projekcie.

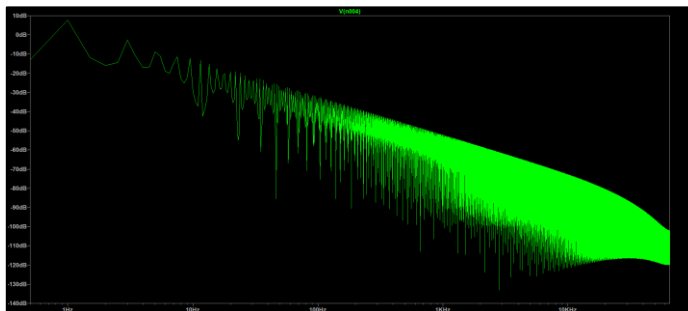
7.2.2 Analiza przebiegu napięcia na kondensatorze C_1



Rys. 12. Przebieg napięcia na kondensatorze C_1

Napięcie na kondensatorze wykazuje zmienny przebieg o wartościach skrajnych: minimalnej około 3,03 V oraz maksymalnej około 6,98 V. Zakres napięcia na kondensatorze wynosi zatem około 3,95 V, co odzwierciedla amplitudę oscylacji sygnału generowanego przez układ.

7.2.3 Analiza widmowa przebiegu napięcia na kondensatorze metodą FFT



Rys. 13. Spektrum częstotliwościowe sygnału

W celu szczegółowej charakterystyki sygnału generowanego przez układ, przeprowadzono analizę częstotliwościową napięcia na kondensatorze z wykorzystaniem *szybkiej transformacji Fouriera* (FFT). Uzyskane wyniki pozwoliły na identyfikację podstawowej częstotliwości oscylacji oraz obecności harmonicznych w sygnale. Widmo FFT wskazuje dominującą składową o częstotliwości odpowiadającej zadanej częstotliwości generatora, co potwierdza stabilność i poprawność działania układu. Ponadto, zaobserwowano obecność kilku harmonicznych o malejącej amplitudzie, co jest charakterystyczne dla sygnałów o kształcie zbliżonym do przebiegów prostokątnych lub trójkątnych, typowych dla generatorów opartych na wzmacniaczach operacyjnych z nieliniową charakterystyką. Obecność harmonicznych wyższego rzędu wskazuje na pewne zniekształcenia sygnału, które mogą wynikać z nieliniowości wzmacniaczy lub niedoskonałości elementów pasywnych, w tym kondensatora.

VIII. PREZENTACJA DZIAŁAJĄCEGO UKŁADU

8.1 Prototyp układu relaksacyjnego



Rys. 14. Fotografia zmontowanej płytki układu relaksacyjnego

W celu prezentacji działania układu zdecydowano się na zlutowanie elementów na płytce prototypowej. Topologia elementów została rozmieszczona w sposób zbliżony do schematu ideowego, co ułatwia śledzenie sygnałów. Na płytce zastosowano goldpiny, które umożliwiają wygodne wyprowadzenie wejścia sygnału, wyjścia sygnału oraz masy

układu. Dzięki temu możliwa jest łatwa obserwacja sygnału okresowego generowanego przez układ. Dodatkowo zastosowanie goldpinów umożliwia bezproblemowe podłączenie zasilacza laboratoryjnego do zasilania układu.

8.2 Wyniki pomiarów napięć oraz analiza sygnałów generowanych przez układ

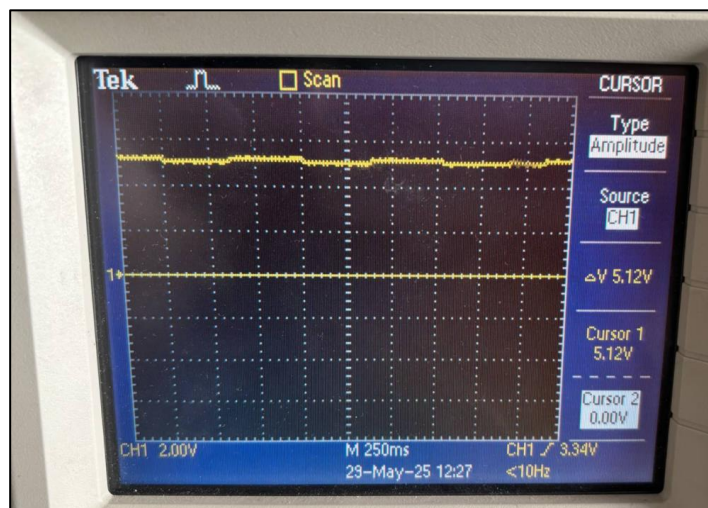
8.2.1 Przebieg napięcia wyjściowego



Rys. 15. Fotografia przebiegu napięcia wyjściowego obserwowana za pomocą oscyloskopu

Podczas przeprowadzonych pomiarów napięcia wyjściowego zaobserwowano poprawny przebieg sygnału okresowego generowanego przez układ. Zmierzona amplituda napięcia wyjściowego wynosi **7,84 V**, co jest wartością zgodną z oczekiwaniami oraz poprawną z punktu widzenia założeń projektowych. Pomiary potwierdzają poprawne działanie układu oraz jego zdolność do generowania sygnału o odpowiednich parametrach.

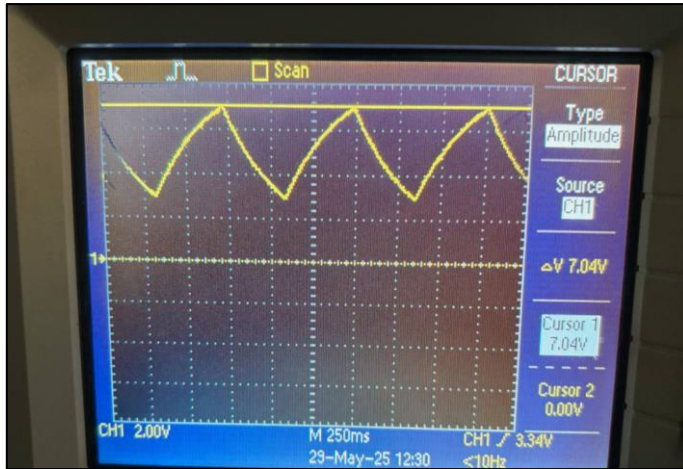
8.2.2 Napięcie referencyjne



Rys. 16. Fotografia napięcia referencyjnego obserwowana za pomocą oscyloskopu

Podczas obserwacji sygnałów na oscyloskopie zmierzono wartość napięcia referencyjnego, która wyniosła **5,12 V**. Jest to wartość prawidłowa i zgodna z założeniami projektowymi. Utrzymanie odpowiedniego poziomu napięcia referencyjnego umożliwia poprawną generację sygnału wyjściowego oraz prawidłowe polaryzowanie układu, co zapewnia jego stabilną i prawidłową pracę.

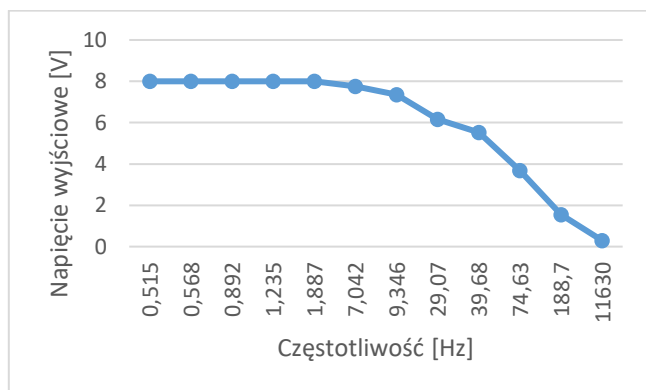
8.2.3 Przebieg ładowania i rozładowania kondensatora



Rys. 17. Fotografia przebiegu napięcia kondensatora C_1 obserwowana za pomocą oscyloskopu

Podczas obserwacji napięcia na kondensatorze z wykorzystaniem oscyloskopu zmierzono wartości: napięcie maksymalne **7,04 V** oraz napięcie minimalne **2,8 V**. Są to wartości prawidłowe i zgodne z oczekiwaniami dla układu relaksacyjnego. Przebieg napięcia na kondensatorze przypomina typowy przebieg piłokształtny, co potwierdza poprawną pracę układu. Dodatkowo obserwacje wykazały, że zachowane jest prawo komutacji, co oznacza, że napięcie na kondensatorze zmienia się w sposób ciągły, bez skoków, co jest charakterystyczne dla tego typu układów.

8.3 Analiza pasma częstotliwościowego



Rys. 18. Wykres wpływu częstotliwości na napięcie wyjściowe układu

Pomiar zależności napięcia wyjściowego układu od częstotliwości sygnału wejściowego został przeprowadzony w celu określenia pasma przenoszenia oraz jakości działania

generatora relaksacyjnego w funkcji częstotliwości. Analiza charakterystyki częstotliwościowej pozwala zweryfikować, w jakim zakresie częstotliwości układ generuje sygnał o stabilnej amplitudzie oraz jak zachowuje się przy wzrastających częstotliwościach. Dzięki temu pomiarowi możliwe jest wyznaczenie zakresu częstotliwości, w którym układ pracuje zgodnie z założeniami projektowymi; ocena stabilności amplitudy sygnału wyjściowego, czy identyfikacja częstotliwości granicznych, przy których następuje znaczne tłumienie sygnału.

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że generator relaksacyjny utrzymuje stałą amplitudę sygnału wyjściowego w zakresie częstotliwości od około **0,515 Hz** do **1,887 Hz**. W tym zakresie układ generuje sygnał o stabilnej mocy, co świadczy o prawidłowym działaniu zgodnym z założeniami projektowymi. Przy częstotliwości około **39,68 Hz** zaobserwowano spadek mocy sygnału wyjściowego o połowę, co definiuje częstotliwość graniczną. Powyżej tej wartości następuje stopniowe tłumienie sygnału, co oznacza, że układ przestaje efektywnie generować sygnał. Dla częstotliwości powyżej około **1 kHz** napięcie wyjściowe spada do wartości bliskich zeru, co potwierdza ograniczenie pasma przenoszenia układu. Taki przebieg charakterystyki częstotliwościowej wskazuje, że układ działa efektywnie tylko w wąskim zakresie częstotliwości niskich, typowym dla generatorów relaksacyjnych, które nie są przeznaczone do pracy przy wysokich częstotliwościach.

Przyczyny ograniczenia pasma przenoszenia układu do niskich częstotliwości:

1. Stała czasowa elementów RC - w układzie generującym sygnał relaksacyjny podstawową rolę odgrywają elementy pasywne, takie jak kondensatory i rezystory. Stała czasowa RC definiuje tempo ładowania i rozładowywania kondensatora, co bezpośrednio wpływa na maksymalną częstotliwość sygnału generowanego przez układ. Przy wzroście częstotliwości kondensator nie zdąża się w pełni naładować i rozładować, co powoduje obniżenie amplitudy sygnału wyjściowego.
2. Ograniczenia elementów aktywnych - elementy aktywne, takie jak tranzystory czy wzmacniacze operacyjne, mają ograniczone pasmo przenoszenia oraz szybkość przełączania. Powyżej pewnej częstotliwości ich zdolność do efektywnego sterowania układem maleje, co skutkuje spadkiem wydajności i tłumieniem sygnału wyjściowego.
3. Prawo komutacji i stabilność pracy układu - generator relaksacyjny działa na zasadzie powtarzalnego cyklu ładowania i rozładowywania kondensatora, zgodnego z prawem komutacji. Przy zbyt wysokich częstotliwościach warunki tego prawa nie są spełniane, co prowadzi do niestabilności oraz zaniku generowanego sygnału.
4. Założenia projektowe - wartości elementów i parametry układu są celowo dobrane do pracy w określonym, niskoczęstotliwościowym zakresie, typowym dla generatorów relaksacyjnych. Ograniczenie pasma jest więc efektem świadomego doboru komponentów i przeznaczenia urządzenia.

X. PODSUMOWANIE

Celem projektu było zaprojektowanie i analiza działania generatora relaksacyjnego zbudowanego w oparciu o dwa wzmacniacze operacyjne LM358. Generator został zaprojektowany tak, aby generować sygnał prostokątny o częstotliwości 1 Hz, umożliwiającą wizualizację pracy układu przy użyciu LED. W trakcie realizacji projektu przeprowadzono analizę teoretyczną układu, wykonano symulacje komputerowe oraz zbudowano i przetestowano układ w warunkach laboratoryjnych. Uzyskane wyniki potwierdziły poprawność założeń projektowych. Generator pracuje stabilnie, a sygnał wyjściowy pozwala na efektywne sterowanie LED. Zastosowanie dwóch wzmacniaczy operacyjnych, w tym jednego w konfiguracji wtórника, umożliwiło odseparowanie obciążenia od obwodu generującego, co zwiększyło odporność układu na zmiany parametrów obciążenia. Podczas testów zidentyfikowano również ograniczenia wynikające z parametrów zastosowanego wzmacniacza LM358, takie jak ograniczony zakres napięć wyjściowych, wpływ napięcia offsetowego oraz prądów polaryzacji wejściowej. Czynniki te mogą wpływać na precyzję generowanego przebiegu oraz jego częstotliwość. Podsumowując, zaprojektowany układ stanowi funkcjonalne rozwiązanie dla prostych zastosowań, takich jak generatory testowe, układy edukacyjne czy systemy sygnalizacyjne.



B. Hadala student Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie na kierunku Elektronika i Telekomunikacja z niesłabnącym zamiłowaniem do mikroprocesorów — tych małych, ale potężnych mózgów, które rządzą światem elektroniki. Zamiast czarować różdżką, woli czarować kodem i układami scalonymi. Kiedy inni zastanawiają się, jak działa budzik, on myśli, jak sprawić, żeby budzik sam zrobił kawę. Wolny czas najchętniej spędza na zgłębianiu tajników elektroniki programowania, marząc o stworzeniu urządzeń, które mogą zmienić przyszłość.

Dominika Bajolek, Hubert Makara