

Sprawozdanie końcowe  
Laboratorium Otwarte

*Wskaźnik zasilania*

Maciej Dzimira

Numer albumu:

**Wrocław, 2021**

## Spis treści

<b>1. Wstęp .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Schemat układu i sposób działania .....</b>	<b>4</b>
2.1 Wpływ parametrów układu na jego pracę .....	5
2.2 Modyfikacje schematu .....	6
<b>3. Symulacja oraz pomiary układu .....</b>	<b>7</b>
3.1 Wykresy związane z pracą tranzystorów Q1 i Q2.....	8
3.2 Analiza poboru mocy przez układ .....	9
3.3 Analiza dotycząca diody LED.....	10
3.4 Symulacja wpływu temperatury na działanie układu.....	14
3.5 Symulacja wpływu rezystancji zasilania na działanie układu.....	15
<b>4. Prototyp układu.....</b>	<b>16</b>
4.1 Pomiar prądu LED oscyloskopem.....	18
<b>5. Projekt płytki drukowanej w Eagle .....</b>	<b>21</b>
5.1 Zestawienie wszystkich komponentów .....	24
<b>6. Wykonanie i pomiary .....</b>	<b>25</b>
6.1 Schematy pomiarowe .....	30
6.2 Pomiary dotyczące pracy tranzystorów Q1 i Q2.....	33
6.3 Pomiary dotyczące pracy diody LED.....	34
6.4 Pomiary dotyczące pobieranej mocy z zasilacza .....	37
6.5 Spostrzeżenia i pomiary dotyczące rezystancji szeregowej zasilacza.....	38
<b>7. Wnioski.....</b>	<b>40</b>
<b>Oświadczenie o samodzielności pracy .....</b>	<b>41</b>
<b>Literatura i źródła wiedzy .....</b>	<b>41</b>

## 1. Wstęp

Projekt obejmuje wykonanie wskaźnika zasilania wykorzystującego migającą diodę LED jako sygnalizator. Częstotliwość impulsów zasilających diodę LED zależy od napięcia zasilania. W przypadku, gdy napięcie zasilające jest niższe od napięcia referencyjnego dioda powinna pozostawać wyłączona. Napięcie referencyjne może być regulowane za pomocą potencjometru.

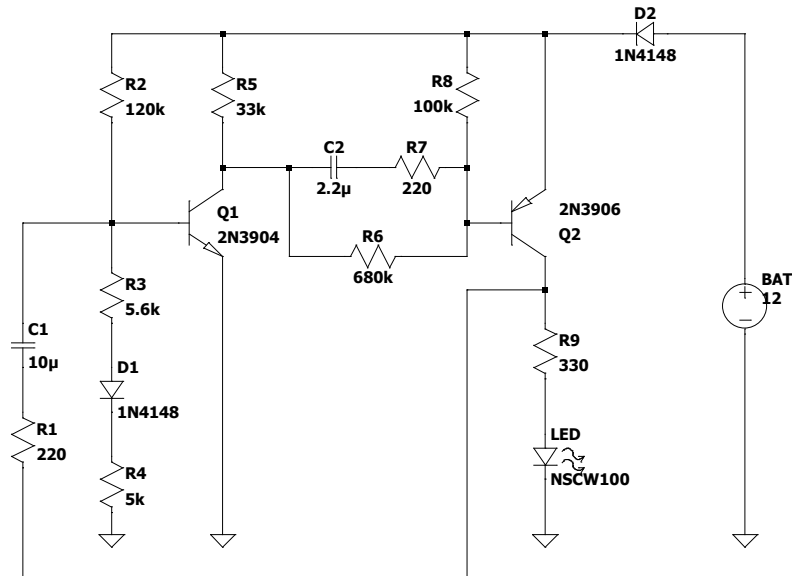
Typowe zastosowanie układu to dołączenie do urządzenia zasilanego bateryjnie (np. za pomocą akumulatora 12 V lub 6 V). Dioda, przez którą przepływa impulsowo prąd w wyniku okresowego przeładowywania pojemności kondensatorów informuje o działaniu układu oraz orientacyjnym napięciu zasilania.

Ideę działania układu zaczerpnięto ze strony [1]. Na podstawie zmodyfikowanego układu wykonano symulację oraz prototyp na płycie stykowej.

Ze względu na trudności w znalezieniu źródeł literaturowych opisujących działanie obwodów zbliżonych do analizowanego, podstawowym źródłem wiedzy na temat sposobu działania było badanie układu przez jego symulacje, pobudzanie zmianami parametrów oraz budowa prototypu na płycie stykowej i jego pomiary za pomocą oscyloskopu. Pomimo wielu różnic, pomocne w zrozumieniu działania układu okazały się materiały dotyczące multiwibratorów: [2], [3] oraz [4].

## 2. Schemat układu i sposób działania

Na rys. 1. przedstawiono schemat ideowy układu.



Rys. 1. Schemat proponowanego układu z [1] (schemat właściwy na Rys. 2.)

Sposób działania układu zbliżony jest do działania multiwibratora, układ bazuje na 2 elementach aktywnych – tranzystorze Q1 i Q2. Kolektor każdego z tranzystorów sprzężony jest z bazą drugiego tranzystora. Konstrukcja przypomina multiwibrator astabilny, jednak ze względu na zastosowanie pary komplementarnej npn i pnp działanie układu można określić jako samowzbudny multiwibrator monostabilny, w którym przez krótką chwilę oba tranzystory są w stanie aktywnym normalnym, a przez większość czasu pozostają w stanie zatkania.

Działanie obwodu inicjowane jest przez włączenie tranzystora Q1 i przepływem prądu przez rezystor R2. Po włączeniu tranzystora Q1 możliwe jest włączenie tranzystora Q2, dzięki ustaleniu na jego bazie napięcia niższego od zasilającego, a w konsekwencji polaryzacji złącza baza-emiter w kierunku przewodzenia. Impulsowy charakter działania układu sprawia, że w trakcie impulsu, w którym złącze baza-emiter w tranzystorze Q1 spolaryzowane jest w kierunku przewodzenia kondensator C2 względem masy osiąga napięcie w przybliżeniu równe  $2 \cdot V_{CC}$ . Potencjał większy od  $V_{CC}$  na bazie Q2 powoduje zamknięcie tranzystora do momentu, w którym napięcie na bazie spadnie do napięcia na emiterze pomniejszonego o 0,7 V (wartość przybliżona dla złącza krzemowego p-n). Włączenie tranzystora Q2 powoduje następnie przepływ prądu przez diodę LED, dopóki ponownie nie włączy się tranzystor Q1. Po każdorazowym impulsowym włączeniu tranzystora Q1, napięcie na jego bazie osiąga wartości

ujemne podtrzymywane pojemnością kondensatora C1 (mechanizm analogiczny jak dla kondensatora C2). Czas, w którym pojemność kondensatora naładuje się i potencjał bazy wyniesie  $\sim 0,7$  V względem emitera definiuje czas, przez który oba tranzystory są w stanie zatkania.

## 2.1 Wpływ parametrów układu na jego pracę

Schemat z rysunku 1. po wstępnym przetestowaniu działa poprawnie i zgodnie z założeniami postawionymi we wstępie. Należy jednak podkreślić, że w układzie można dokonać wielu drobnych ulepszeń i poprawek. Pierwszą podstawową zmianą jest dodanie zabezpieczenia chroniącego przed odwrotnym podłączeniem baterii – dodanie szeregowej diody do wejścia układu. Ze względu na mały prąd pobierany przez obwód (typowo nie więcej niż 100 mA) nie musi być to dioda prostownicza dużej mocy – z tego względu zastosowano taką samą diodę jak D1.

Zmieniając pojemność kondensatora C2 zmienia się stałą czasową gałęzi włączającej bazę tranzystora Q2 (a tym samym Q1 – sprzężenie). Zmniejszając pojemność kondensatora zmniejsza się o kilka procent czas impulsu, podczas którego baza tranzystora spolaryzowana jest w kierunku przewodzenia i przez LED płynie prąd. Nie wpływa to zauważalnie na właściwości sygnalizacyjne układu, jednak zmniejsza się (nieznacznie) pobór mocy z baterii/akumulatora.

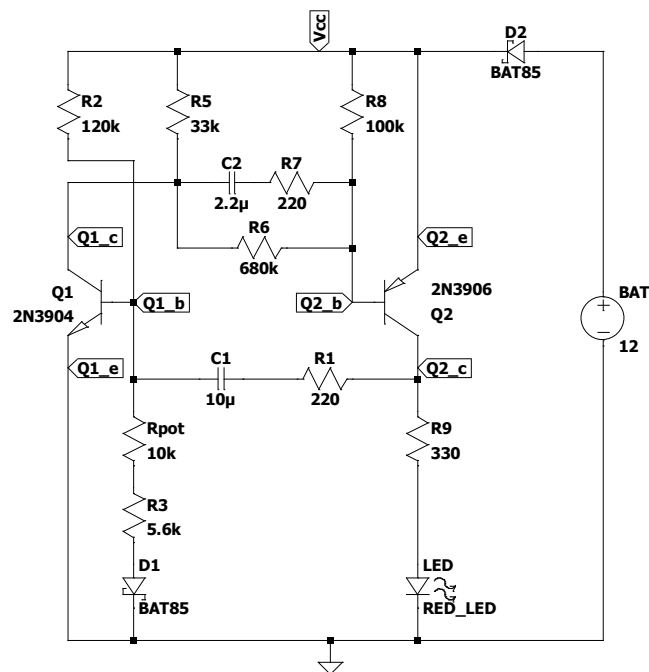
Pojemność kondensatora C1 w głównej mierze wpływa na częstotliwość generowanych impulsów. Należy mieć na względzie, że obwód ma za zadanie pełnić funkcję ostrzegawczą i nie powinno zmniejszać się częstotliwości w celu oszczędzania energii, gdyż może to wpłynąć na bezpieczeństwo.

Modyfikacja warta rozważenia z perspektywy funkcjonalnej i ekonomicznej to usunięcie rezystora R3 i zwiększenie wartości potencjometru (np. do 20 k $\Omega$ ), co pozwoli na większe dopasowanie napięcia, przy którym układ ma przestać kluczować diodę. Impedancja w tej gałęzi nie wpływa krytycznie na działanie układu, pomijając jakąkolwiek rezystancję poza dynamiczną diody prąd nie będzie większy niż  $\sim 40$   $\mu$ A. Jednak ze względu na ograniczone posiadane zasoby (potencjometry 10 k $\Omega$ ) zdecydowano o pozostawieniu tego elementu, aby móc stosować układ w obwodach zasilanych napięciem 5 V (w praktyce minimalny próg to około 4,5 V dla impedancji  $\sim 15$  k $\Omega$  w gałęzi).

Zwiększenie wartości rezystancji rezystora szeregowo połączony z diodą LED (R9) pozwala na zmniejszenie prądu LED w impulsie. Dzięki temu zmniejsza się moc wydzielana w układzie, a ponadto układ może działać z wyższymi napięciami bez uszkodzenia diody LED co zwiększa jego uniwersalność. Zdecydowano o zwiększeniu wartości rezystancji rezystora R9 do 330  $\Omega$ .

## 2.2 Modyfikacje schematu

W celu wyeliminowania konieczności zamawiania nowych elementów i wykorzystania zasobów własnych, dokonano zamiany pary tranzystorów BC547B i BC557B na 2N3904 i 2N3906. Tranzystory mają zbliżone parametry i nie wpływają znacząco na działanie układu.

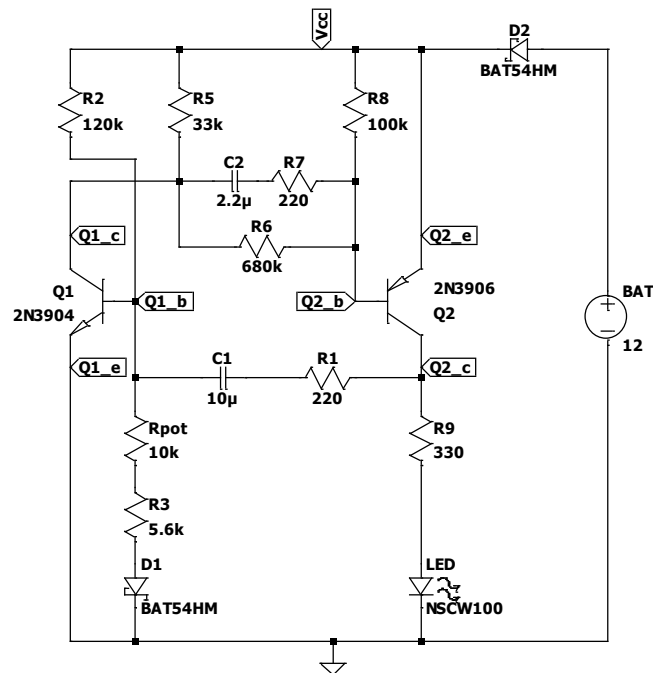


Rys. 2. Schemat układu po usprawnieniach

W celu zwiększenia czytelności schematu postanowiono ułożyć go w taki sposób, aby zbliżyć go do tradycyjnych układów multiwibratorów występujących w literaturze [2].

### 3. Symulacja oraz pomiary układu

Ze względu na braki niektórych z elementów w LTSpice, na których planowano wykonanie układu przyjęto pewne uproszczenia w symulacji: zamiast czerwonej LED zastosowano diodę białą, oraz zamiast diod BAT85 (posiadanych) zastosowano diody BAT54HM o zbliżonych parametrach. W symulacjach kolejno dokonano analizy wpływu dwóch parametrów jakimi są: nastawa potencjometru Rpot (przyjęto 3 stałe: 1  $\Omega$ , 5 k $\Omega$  i 10 k $\Omega$ ) oraz napięcie zasilające układ VCC (parametr 0-14 V).



Rys. 3. Schemat ideowy układu w programie LTSpice

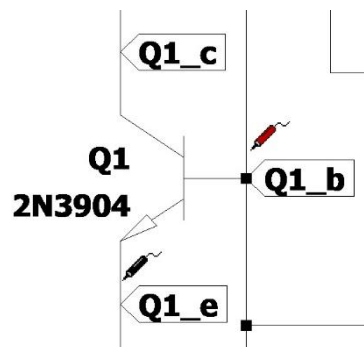
W trakcie symulacji poddano analizie następujące parametry:

- natężenie prądu płynącego przez diodę LED (dla wielu parametrów),
- napięcie baza-emiter tranzystora Q1,
- napięcie baza-emiter tranzystora Q2,
- moc pobierana przez układ,
- wpływ temperatury na działanie układu,
- wpływ rezystancji szeregowej źródła zasilania.

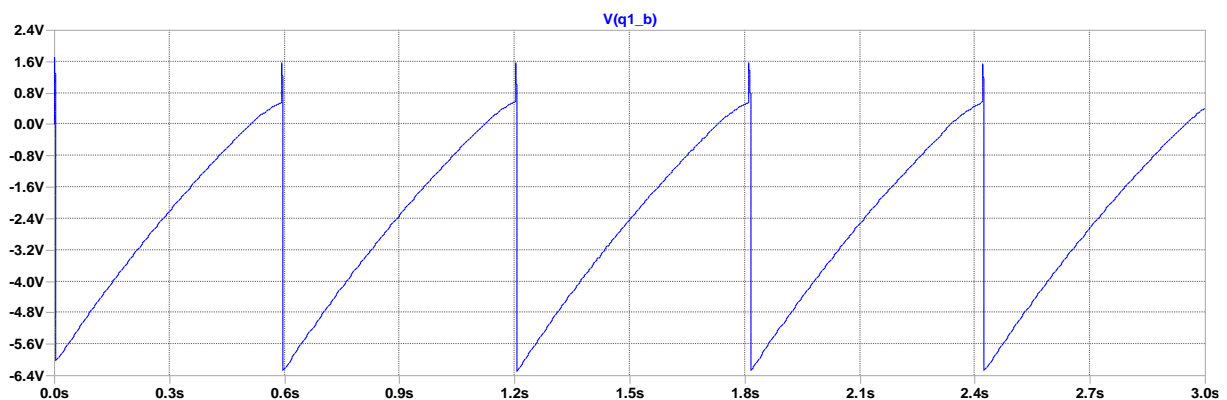
Biorąc pod uwagę właściwości aplikacyjne układu, za najważniejsze zostały uznane natężenie prądu płynącego przez LED oraz moc pobierana przez układ. Szczegółowa analiza dokonywana jest dla napięcia bateryjnego 12 V – założono, że takie napięcie będzie najczęściej wykorzystywane.

### 3.1 Wykresy związane z pracą tranzystorów Q1 i Q2

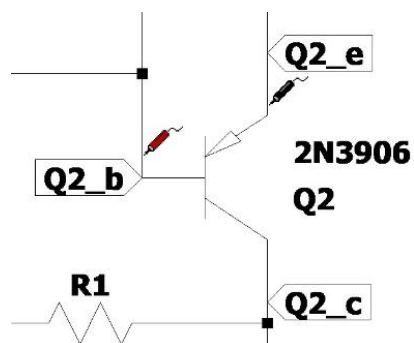
Rysunki 5. i 7. ukazują przebiegi zgodne z oczekiwanymi. Podczas krótkich impulsów włączających tranzystory Q1 i Q2 napięcia na ich bazach osiągają po krótkiej chwili wartości utrzymujące je w stanie zatkania przez resztę okresu działania (napięcia podtrzymywane pojemnościami kondensatorów). Okres czasu, który zajmuje przeładowanie napięć na tych kondensatorach przez rezystory definiuje częstotliwość włączania diody LED (czyli czas ponownego włączenia obu tranzystorów).



Rys. 4. Fragment schematu przedstawiający pomiar napięcia baza-emiter tranzystora Q1

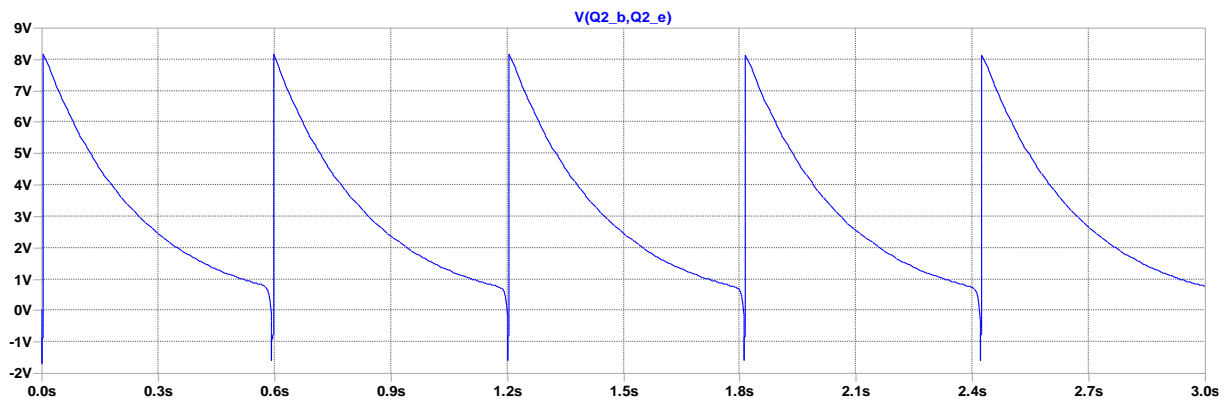


Rys. 5. Przebieg napięcia baza-emiter tranzystora Q1 ( $V_{CC} = 12\text{ V}$ ,  $R_{pot} = 10\text{ k}\Omega$ )



Rys. 6. Fragment schematu przedstawiający pomiar napięcia baza-emiter tranzystora Q2

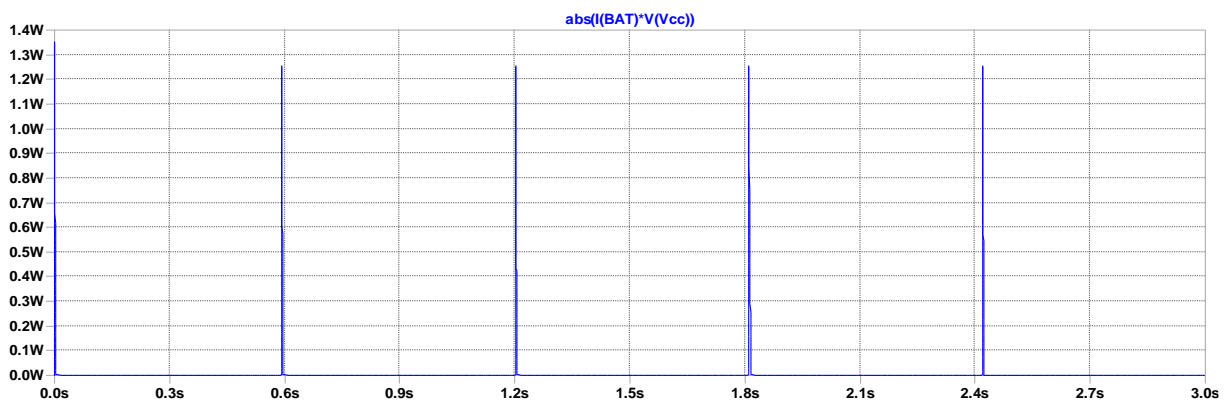




Rys. 7. Przebieg napięcia baza-emiter tranzystora Q2 ( $V_{CC} = 12\text{ V}$ ,  $R_{pot} = 10\text{ k}\Omega$ )

### 3.2 Analiza poboru mocy przez układ

Na rysunku 8. przedstawiono analizę mocy pobieranej przez układ, zgodnie z oczekiwaniami – największa moc pobierana jest podczas impulsu, w którym tranzystory są włączone i dioda LED jest włączona. Warto podkreślić fakt, że to nie moc pobierana przez diodę stanowi większość mocy pobieranej przez układ. Moc wydzielana na diodzie stanowi około 10% całkowitej mocy pobieranej z baterii co jest niepokojące, jednak wynika z zasady działania układu i nie może być znacząco skorygowana.



Rys. 8. Przebieg poboru mocy z baterii ( $V_{CC} = 12\text{ V}$ ,  $R_{pot} = 10\text{ k}\Omega$ )

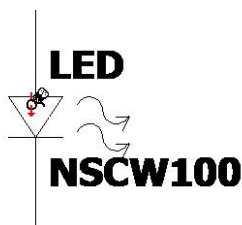
Średnia moc pobierana przez układ w cyklu pracy przy założeniu napięcia zasilania równemu  $12\text{ V}$  i nastawie potencjometru na  $10\text{ k}\Omega$  wynikającym z tego przybliżonym czasie impulsu  $4\text{ ms}$ , czasie pomiędzy impulsami  $600\text{ ms}$  oraz poborze mocy w pikie  $1,25\text{ W}$  wynosi:

$$\frac{1,25\text{ W} \cdot 4\text{ ms}}{600\text{ ms} + 4\text{ ms}} = \frac{1,25\text{ W}}{151} = 8,27\text{ mW} \quad (1)$$

Średni pobór mocy przez układ jest mały, co korzystnie wpływa na możliwości aplikacyjne układu. W przypadku zasilania napięciem sieciowym koszt działania urządzenia jest pomijalny, a w przypadku zasilania baterijnego obwód względem większości układów, do których będzie dołączony nie będzie znacząco obciążał baterii.

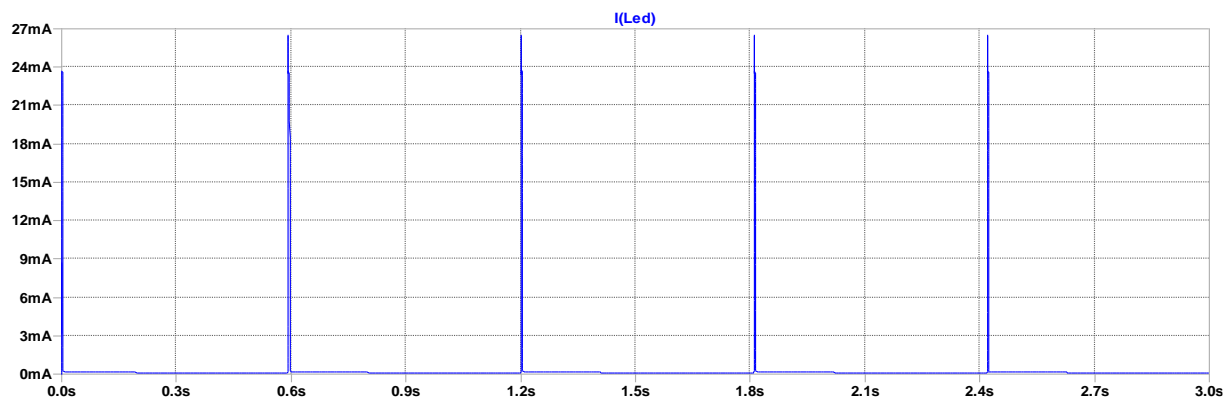
### 3.3 Analiza dotycząca diody LED

Rysunek 9. przedstawia metodę wykorzystywaną w symulacji, polegającą na szeregowym włączeniu sond amperomierza w obwód. W rozdziale 4. dotyczącym prototypu przedstawiany jest pomiar prądu LED z wykorzystaniem spadku napięcia na rezystorze o znanej wartości.



Rys. 9. Fragment schematu przedstawiający sposób pomiaru prądu diody LED

Rysunek 10. przedstawia zgodny rysunkami 5. oraz 7, a także oczekiwaniami dotyczącymi działania układu, przebieg prądu diody LED.



Rys. 10. Przebieg natężenia prądu na diodzie LED ( $V_{CC} = 12\text{ V}$ ,  $R_{pot} = 10\text{ k}\Omega$ )

W tabeli 1. zestawiono porównanie dotyczące wpływu napięcia zasilającego układ na prąd przepływający przez diodę.

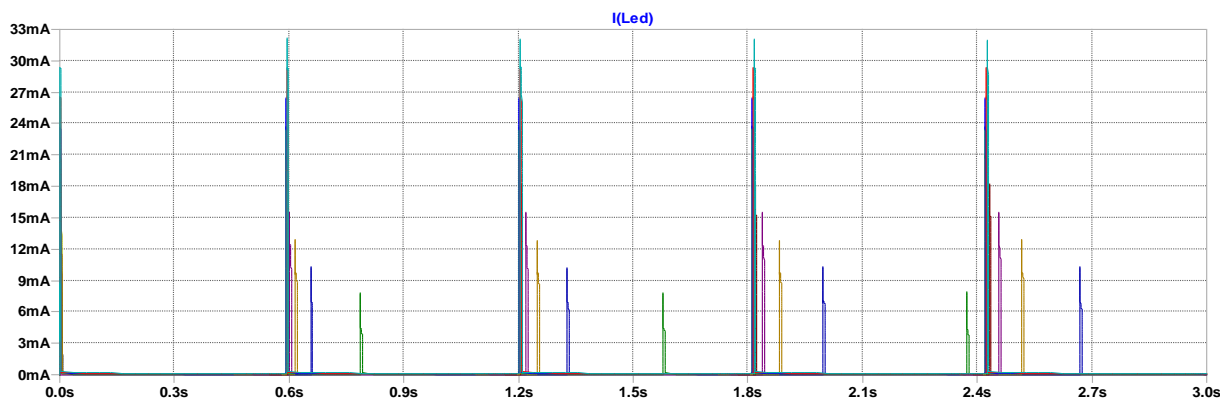
Tabela 1. Dane zebrane na podstawie symulacji z rysunku 8. ( $R_{pot} = 10 \text{ k}\Omega$ )

Napięcie zasilające, VCC [V]	Prąd LED, I <sub>LED</sub> [mA]
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	8
6	10
7	13
8	16
9	18
10	21
11	24
12	26
13	29
14	32

Do przemiatań parametrem VCC wykorzystano dyrektywę LTSpice:

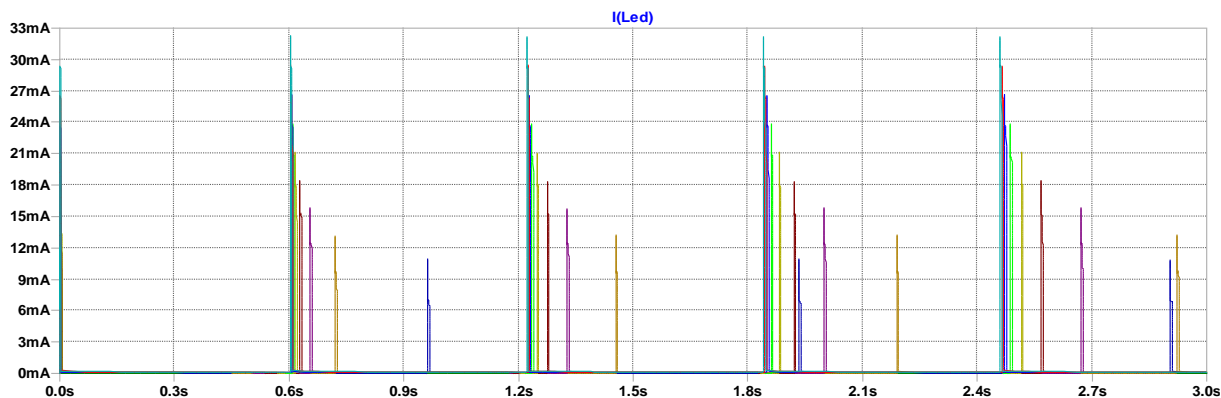
```
.step param Vcc 0 14 1
```

(ustalając w schemacie wartość napięcia baterii BAT jako „{Vcc}”)



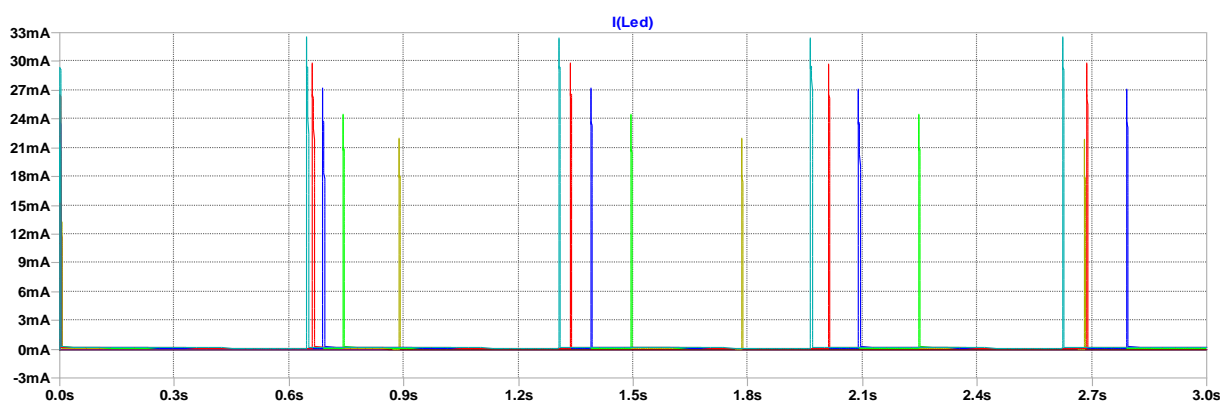
Rys. 11. Przebieg natężenia prądu na diodzie LED ( $V_{CC} = \text{parametr}$ ,  $R_{pot} = 10 \text{ k}\Omega$ )

Najniższe napięcie, dla którego dioda LED włącza się wynosiło 5 V dla  $R_{pot} = 10 \text{ k}\Omega$ .



Rys. 12 Przebieg natężenia prądu na diodzie LED ( $V_{CC}$  = parametr,  $R_{pot} = 5 \text{ k}\Omega$ )

Najniższe napięcie, dla którego dioda LED włącza się wynosi 7 V dla  $R_{pot} = 5 \text{ k}\Omega$ .



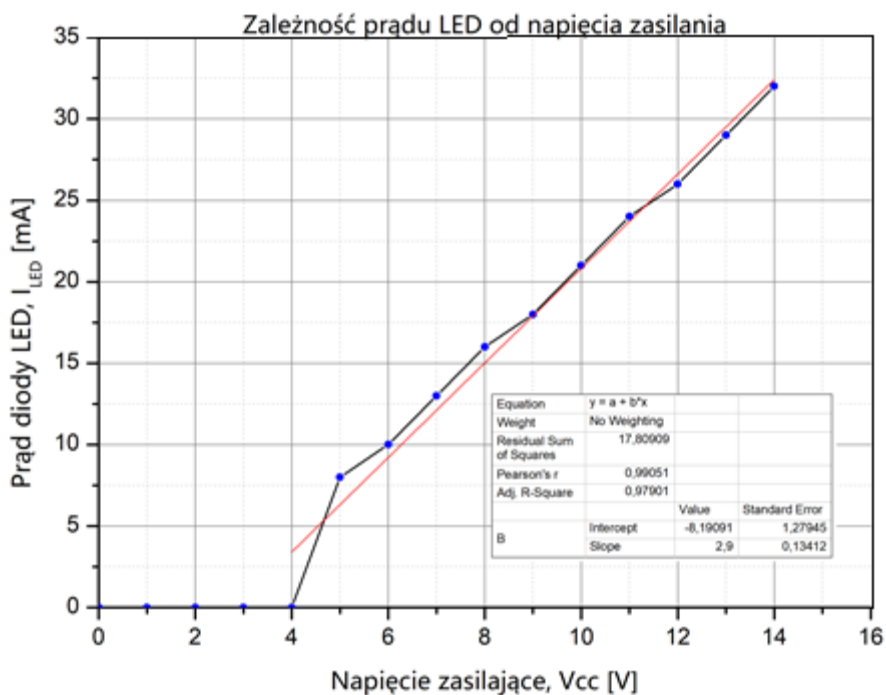
Rys. 13 Przebieg natężenia prądu na diodzie LED ( $V_{CC}$  = parametr,  $R_{pot} = 1 \Omega$ )

Najniższe napięcie, dla którego LED włącza się wynosi 11 V dla  $R_{pot} = 1 \Omega$ .

Rysunki 11-13, zgodnie z oczekiwaniami dotyczącymi wpływu nastawy potencjometru na działanie układu, pokazują jak ze zmniejszeniem się impedancji w gałęzi diody D1 zwiększa się napięcie progowe, od którego układ informuje o zasilaniu. Natężenie prądu przepływającego przez diodę LED dla napięć zasilających niższych niż ustawiony próg potencjometrem  $R_{pot}$  wynosi 0, tranzystory nie zostają włączone – dioda nie świeci się.

W symulacji częstotliwość generowanych impulsów nie zmienia się w sposób zauważalny w zależności od przykładanego napięcia. W przybliżeniu wynosiła około 1,5-1,7 Hz dla wszystkich badanych przebiegów. Analizując wyniki symulacji można stwierdzić, że nie jest to parametr krytyczny układu, ponieważ bardzo trudnym będzie zauważenie różnicy na poziomie 0,1 Hz. Z tego powodu na etapie symulacji zdecydowano się pominąć szczegółowe analizy wpływu napięcia i nastawy potencjometru na częstotliwość. Zostanie to przeprowadzone w trakcie badania ostatecznego układu (zaobserwowano rozbieżności między symulacją, a funkcjonalnym prototypem).

Na podstawie analizy rysunku 14. można stwierdzić, że natężenie prądu płynącego przez diodę LED zmienia się prawie liniowo. Jest to zaleta, która świadczy o dobrych właściwościach układu działającego jako detektor. Jednak ze względu na ograniczone zdolności percepcji człowieka ta właściwość może nie mieć praktycznego zastosowania.

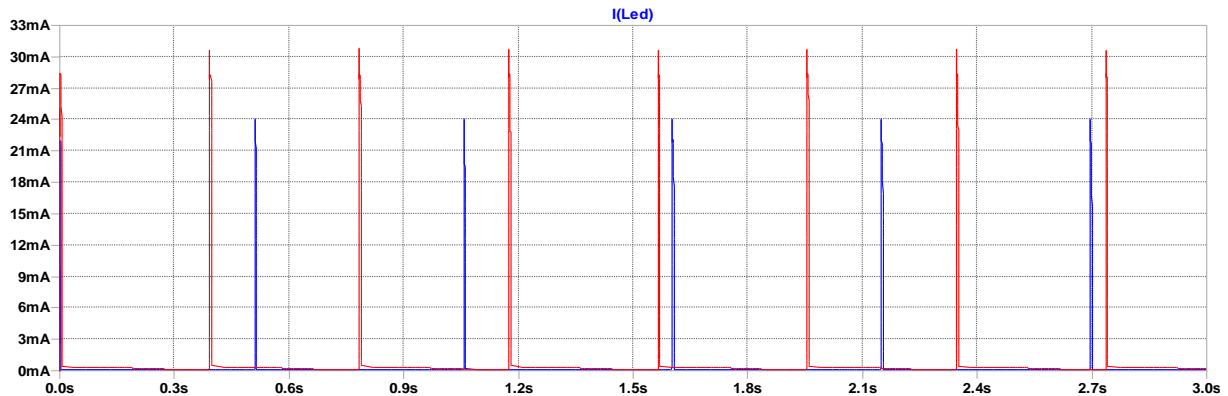


Rys. 14. Zależność prądu diody LED od wartości napięcia zasilania (na podstawie tabeli 1.)

### 3.4 Symulacja wpływu temperatury na działanie układu

Do symulacji wykorzystano dyrektywę LTSpice:

```
.temp -50 150
```



Rys. 15. Przebiegi prądu na diodzie LED dla temperatur: -50°C (niebieski) oraz 150°C (czerwony)

Symulacja temperaturowa przeprowadzona została dla temperatury 150°C oraz dla temperatury -50°C, w trakcie symulacji sprawdzono natężenie prądu przepływającego przez LED. Ze względu na fakt, że prąd dla temperatury 150°C okazał się mniejszy niż dopuszczalny dla zastosowanej diody oraz że układ wciąż pełnił swoją rolę dla temperatury -50°C uznano, że dalsza analiza wpływu temperatury na komponenty nie jest niezbędna, a rzeczywiste górne ograniczenie zakresu temperatury wynika z dopuszczalnych temperatur dla stosowanych komponentów (kondensatory certyfikowane w zakresie -40°C do 105°C). Należy podkreślić, iż wartości temperatury, dla których przeprowadzona została symulacja zostały zawyżone, a rzeczywiste wartości będą zbliżone do warunków atmosferycznych lub temperatury pokojowej (w zależności od zastosowania układu).

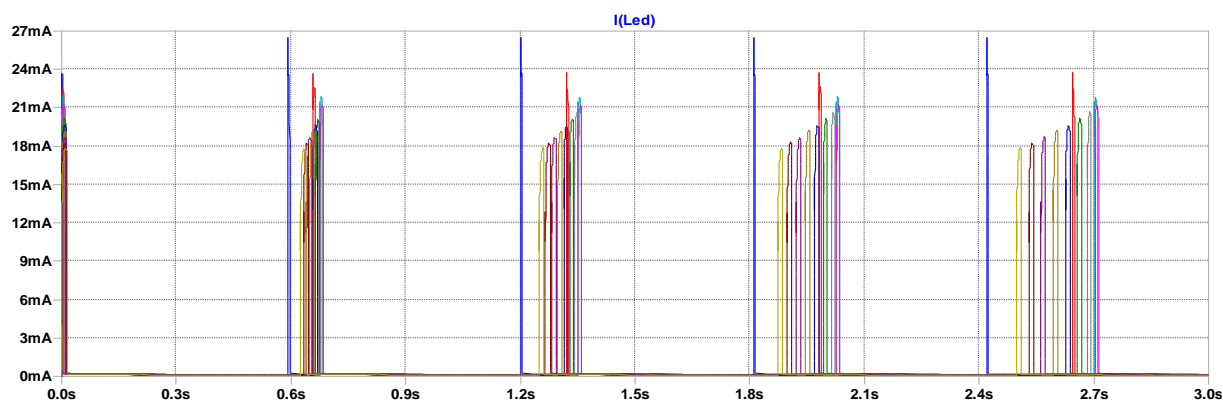
Częstotliwość impulsów diody w przypadku temperatury 150°C wynosiła w przybliżeniu 2,57 Hz, a w przypadku temperatury -40°C częstotliwość wynosiła 1,81 Hz. Rozbieżności w tak szerokim zakresie temperatury nie wpływają w sposób znaczący na informacyjne działanie układu, niemniej jednak są zauważalne.

### 3.5 Symulacja wpływu rezystancji zasilania na działanie układu

Do przemiatań parametrem Rser wykorzystano dyrektywę LTSpice:

```
.step param Rser 0 100 10
```

(ustalając w schemacie wartość Rser jako „{Rser}”)



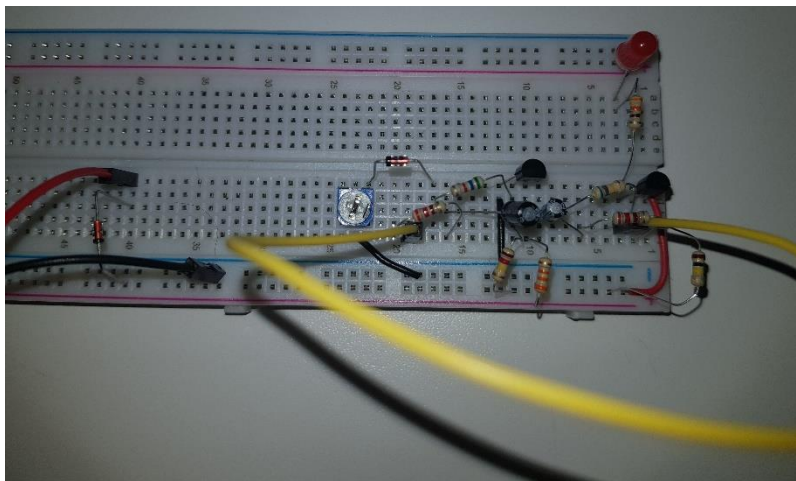
Rys. 16. Przebiegi prądu na diodzie LED dla różnych rezystancji szeregowych źródła zasilania

Na podstawie rysunku 16. można stwierdzić, że impedancja układu jest na tyle duża, że rezystancja szeregową źródła zasilania wynosząca nawet  $100 \Omega$  nie wpływa znacząco na podstawową funkcję układu. Docelowym źródłem zasilania układu będą akumulatory 12 V, które cechują się względnie niską (poniżej  $1 \Omega$ ) rezystancją szeregową. Po dokładniejszej analizie i przeszukaniu informacji dotyczących oczekiwanych wartości rezystancji wewnętrznych różnych źródeł zasilania autor projektu zdecydował, że wprowadzanie zmian w układzie nie są konieczne, gdyż rozpatrywany w symulacji zakres powinien pokrywać rezystancje wewnętrzne wszystkich źródeł.

## 4. Prototyp układu

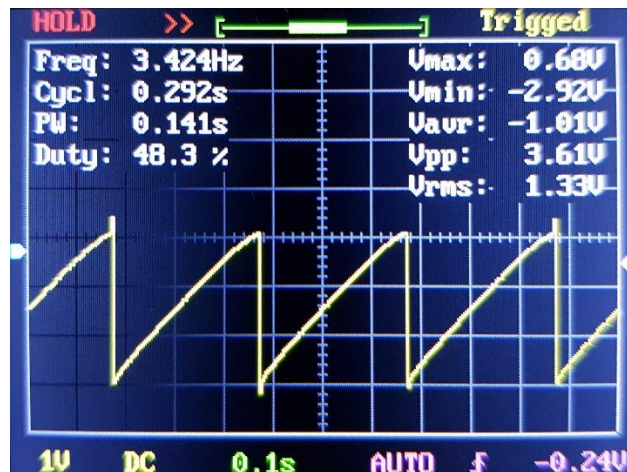
W celu potwierdzenia symulacji i opisanych zależności w rozdziale 2, oraz ze względu na fakt posiadania wszystkich elementów niezbędnych do realizacji układu postanowiono o realizacji oraz badaniu prototypu układu na płytce stykowej. Ze względu na trudności pracy z oscyloskopem (DSO150) pomiary przeprowadzone z jego udziałem mogą nie pokrywać się z rzeczywistością – niska częstotliwość próbkowania 1 MS/s znacząco utrudnia akwizycję szybkozmiennych przebiegów (w szczególności impulsów). W praktyce zarejestrowanie przebiegu wymagało ręcznego zablokowania ekranu na zarejestrowanym przebiegu i manualnego odczytu. Wbudowany trigger bardzo często miał problemy przy częstotliwościach impulsów mniejszych od 5 Hz, niezależnie od manualnie ustawionego progu. Pomimo ręcznych odczytów bardzo często objawiały się dziwne zniekształcenia, które zależały od ustawienia podstawy czasu.

Z tego powodu ograniczono się do pomiarów (a precyzyjniej podejrzenia) przebiegów napięć baza-emiter dla obu tranzystorów przy napięciu zasilającym 12 V oraz orientacyjnego pomiaru natężenia prądu na diodzie dla napięć zasilających układ w zakresie 5 do 14 V co 1 V.



Rys. 17. Prototyp zrealizowany na płytce stykowej





Rys. 18. Przebieg napięcia baza-emiter tranzystora Q1



Rys. 19. Przebieg napięcia baza-emiter tranzystora Q2

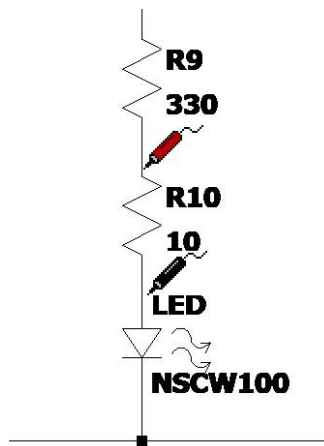
Zmierzone przebiegi napięcia na kondensatorach nie odpowiadają oczekiwanym przebiegom z symulacji, choć są zbliżone. Jedną z pośrednich przyczyn może być wcześniej wytłumaczony problem dotyczący akwizycji pomiarów przez oscyloskop oraz wpływ obciążenia układu samym oscyloskopem. Należy jednak zauważyć, że przebiegi zmierzone nie odzwierciedlają dokładnie przebiegów uzyskanych w symulacji to ogólna zasada działania układu wciąż jest zachowana (włączenie tranzystora Q1 napięciem baza-emiter wyższym niż około 0,7 V, analogicznie -0,7 V w przypadku tranzystora Q2).

Jednym z ciekawszych zaobserwowanych zjawisk był większy wpływ napięcia zasilającego układ na częstotliwość włączania diody LED niż wynikałoby to z przeprowadzonych symulacji. Już z oscylogramów przedstawionych na rysunkach 18. i 19. Można zauważyć, że częstotliwość zwiększyła się prawie dwukrotnie do około wartości 3,5 Hz.

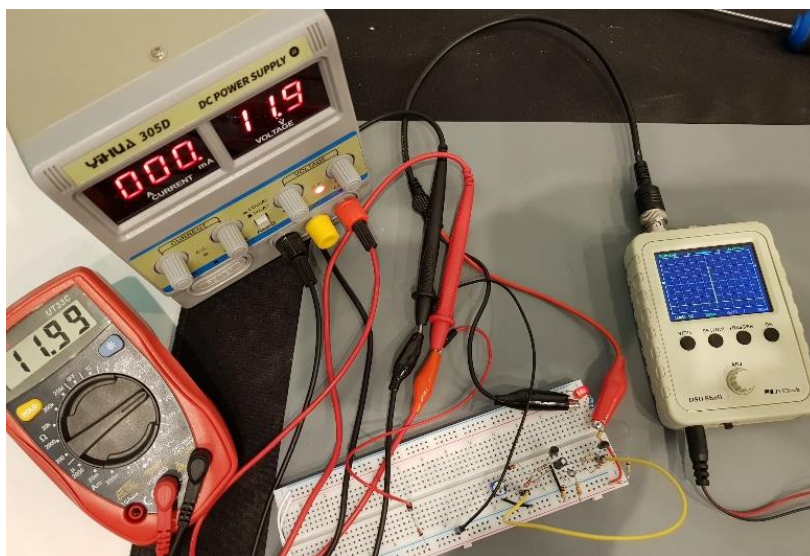
Ze względu na problemy z pomiarem częstotliwości niższych niż 5 Hz za pomocą oscyloskopu w badanym układzie, oraz brak w obecnej chwili możliwości precyzyjnego pomiaru tej częstotliwości innym przyrządem (poza oczywiście przybliżonym wyznaczeniem z oscylogramów) założono, że szczegółowa analiza tego zjawiska odbędzie się po wykonaniu ostatecznego układu.

#### 4.1 Pomiar prądu LED oscyloskopem

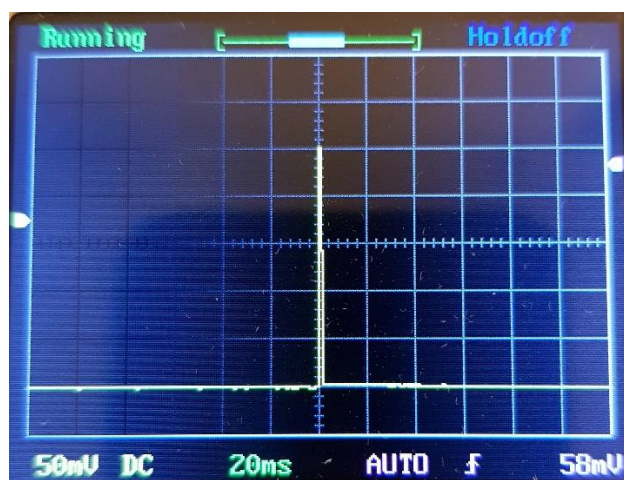
W celu pomiaru oscyloskopem natężenia prądu diody dodano do jej gałęzi szeregowo rezystor 10  $\Omega$ . Wiedząc jaka jest rezystancja rezystora i mierząc oscyloskopem spadek napięcia na jego wyprowadzeniach wyznaczono prąd w jego gałęzi korzystając z przekształconego prawa Ohma.



Rys. 20. Sposób pomiaru prądu w gałęzi LED



Rys. 21. Procedura pomiarowa dla natężenia prądu na diodzie LED (pomiar na rezystorze 10  $\Omega$ )



Rys. 22. Przebieg napięcia na rezystorze pomiarowym  $10\ \Omega$  dla  $V_{CC} = 12\ V$

Na podstawie metody pomiarowej przedstawionej na rysunku 20. wyznaczono przebiegi napięcia na wyprowadzeniach rezystora pomiarowego i korzystając z przekształconego prawa Ohma wyznaczono prąd na diodzie LED dla napięć ustawionych na zasilaczu laboratoryjnym. Dla pewności kontrolowano napięcia wyjściowe zasilacza za pomocą multimetru. Dla przykładowego odczytu z rysunku 22. przy napięciu zasilającym wynoszącym  $12\ V$ :

$$I_{LED} = \frac{250\ mV}{10\ \Omega} = 25\ mA \quad (2)$$

Analogicznie wykonano pomiary dla pozostałych napięć zasilających układ. Pomiary były wykonywane dla maksymalnej nastawy potencjometru ( $10\ k\Omega$ ). Zebrane dane zestawiono w tabeli 2.

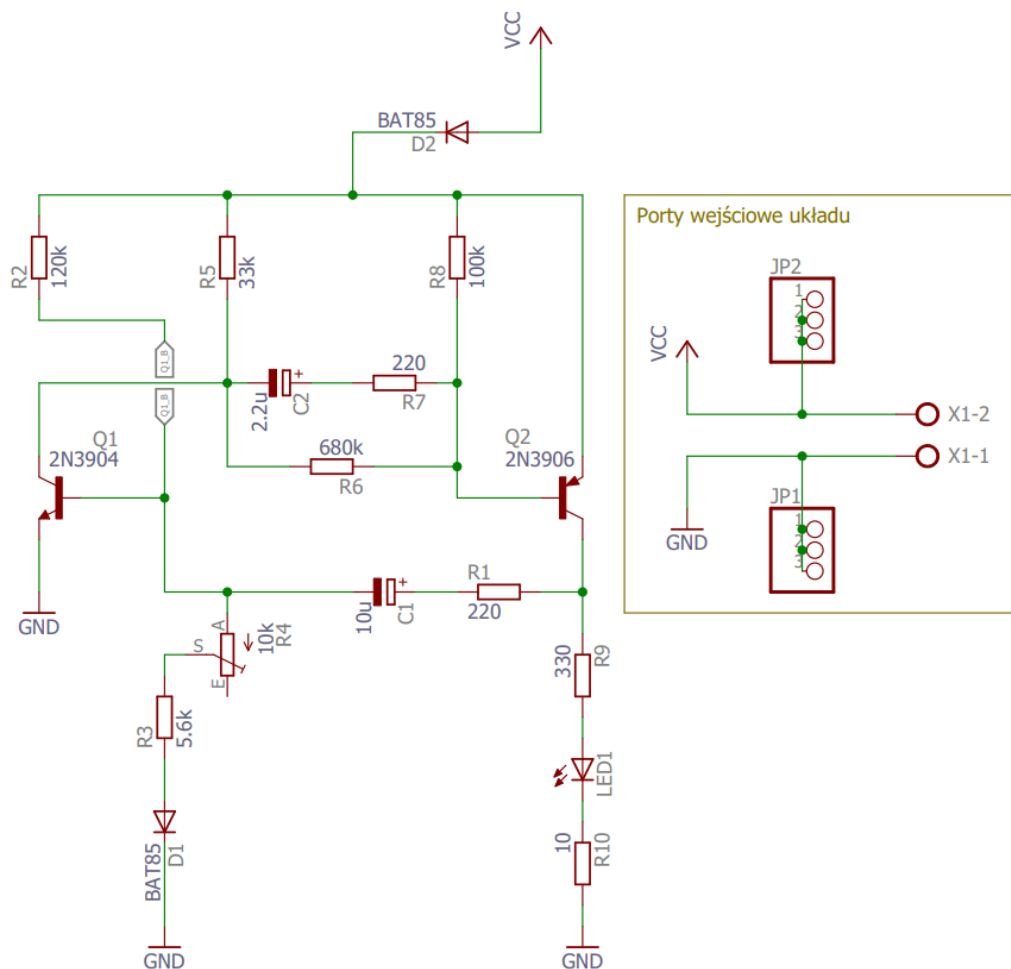
Tabela 2. Dane zebrane na podstawie przemiatania parametrem VCC i pomiaru natężenia prądu LED

<b>Napięcie zasilające, VCC [V]</b>	<b>Prąd LED, I<sub>LED</sub> [mA]</b>
4,98	7
5,99	10
7,01	13
8,00	16
8,96	19
10,02	21
10,98	23
11,99	25
13,02	29
13,97	33

Na podstawie zgromadzonych danych w tabeli 2 można stwierdzić, że prąd płynący przez diodę LED jest zbliżony z danymi uzyskanymi w symulacji w tabeli 1. Wszelkie niedokładności mogą wynikać z niedoskonałej procedury pomiarowej oraz dodatkowego obciążenia gałęzi diody rezystorem 10  $\Omega$  (najmniejsza wartość z najdokładniejszego posiadanego szeregu).

## 5. Projekt płytki drukowanej w Eagle

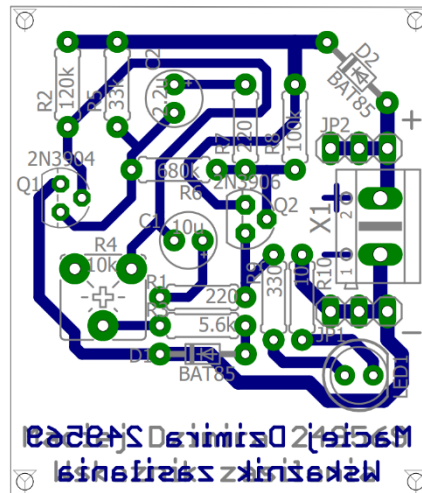
W celu zaprojektowania warstwy ścieżek oraz rozmieszczenia komponentów niezbędne okazało się narysowanie schematu w programie Eagle. W trakcie rysowania schematu podjęto decyzję o dodaniu złącz kołkowych (goldpin) do linii zasilającej oraz masy, a także złącza ARK w celu umożliwienia łatwiejszego podłączenia układu. Schemat zaprojektowano zgodnie ze schematem z rysunku 2.



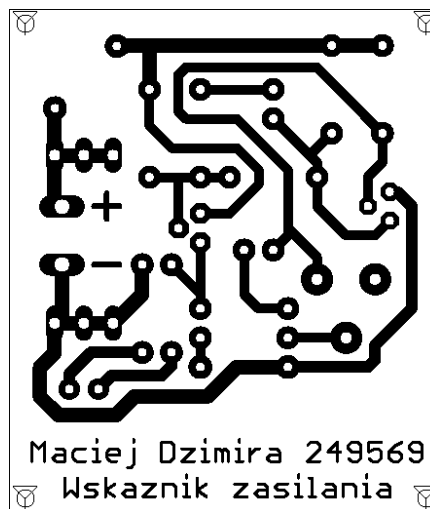
Rys. 23. Schemat zaprojektowany w programie Eagle

Aby wykonać pomiar prądu w gałęzi diody LED, podobnie jak w przypadku prototypu, do schematu dodano rezystor R10 o wartości 10  $\Omega$ . W trakcie pracy układu zostanie na nim wykonany pomiar napięcia oscyloskopem i zgodnie z przekształconym prawem Ohma wyznaczony zostanie prąd płynący przez LED.

Docelowy wymiar płytki to 38x44 mm, możliwe jest jednak zmniejszenie tego wymiaru przez ograniczenie opisów tekstowych zbliżenie do siebie komponentów. Ten zabieg mógłby jednak utrudnić proces produkcji płytki drukowanej i na tej podstawie zdecydowano, że zmniejszanie wymiaru płytki nie jest konieczne.



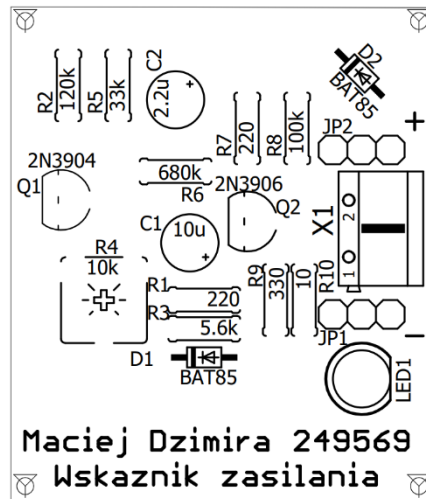
Rys. 24. Rozmieszczenie elementów na płytce PCB (skala 1,5:1)



Rys. 25. Topologia połączeń (skala 1,5:1)

W trakcie projektowania schematu ścieżek starano się wykorzystać jedną warstwę laminatu. Jednocześnie ze względu na niewielkie prądy pobierane przez układ oraz zasilanie względnie niskim napięciem (typowo 12 V) rozmieszczenie topologii nie wymagało rygorystycznego planowania odległości między ścieżkami ani ich szerokości. Zastosowano się do podstawowych zasad zaimportowanych z dostarczanych na stronie kursu pliku „OpenLab.dru”. Układ ścieżek i elementów poddawany był modyfikacjom, do czasu aż

sprawdzanie błędów DRC przestało wykazywać błędy dotyczące układu. Po ostatecznym ułożeniu wszystkich komponentów jedynym elementem zwracającym błąd „Width” był element opisu tekstowego znajdującego się na dolnej stronie płytki, postanowiono ręcznie zaakceptować ten błąd, gdyż dotyczył jedynie minimalnej szerokości tekstu opisowego i nie wpływał na działanie układu.



Rys. 26. Warstwa opisowa (skala 1,5:1)

Prezentowaną na rysunku 26. warstwę opisową potraktowano jako opcjonalną ze względu na możliwe problemy związane z przeniesieniem jej na laminat. W razie przeniesienia na płytkę z wykorzystaniem odbicia tonera na laminacie warstwa opisowa zostanie wydrukowana w odbiciu lustrzanym.

Autor projektu zastrzega sobie możliwość modyfikacji warstw w razie potrzeby ze względu na możliwe trudności podczas przenoszenia układu na laminat.

## 5.1 Zestawienie wszystkich komponentów

W tabeli 3. przedstawiono zestawienie wszystkich elementów wykorzystanych do budowy układu.

Tabela 3. Zestawienie wszystkich niezbędnych komponentów

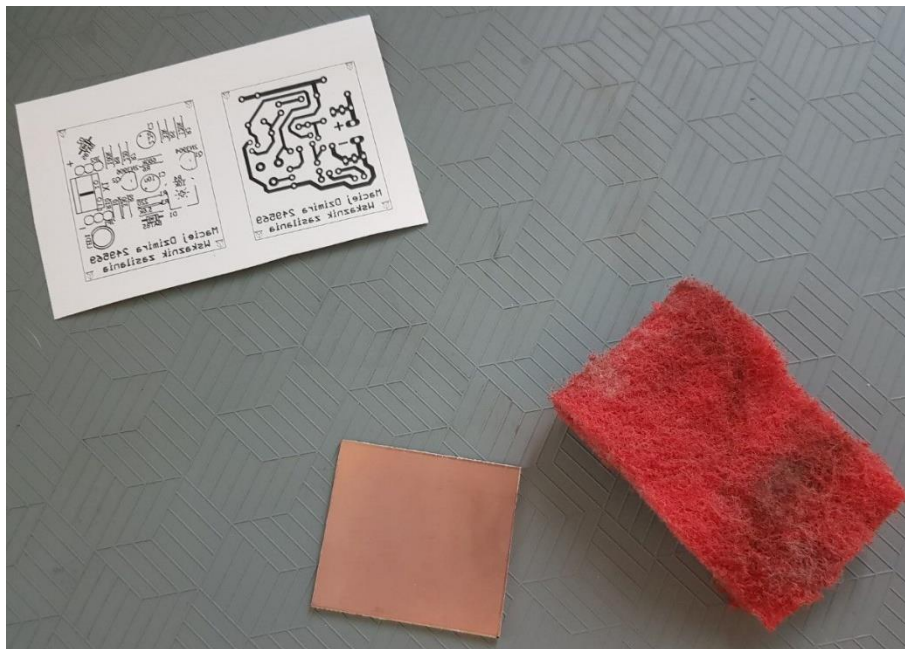
Nazwa	Typ	Wartość	Obudowa
Q1	tranzystor	2N3906	TO92
Q2	tranzystor	2N3904	TO92
C1	kondensator elektrolityczny	10 $\mu$ F	$\varnothing$ 6,3x11mm (raster 2,5 mm)
C2	kondensator elektrolityczny	2,2 $\mu$ F	$\varnothing$ 5x11mm (raster 2 mm)
D1	dioda	BAT85	SOD68
D2	dioda	BAT85	SOD68
LED1	dioda LED		5 mm
JP1	złącze		złącze kolkowe męskie x3 (raster 2,54 mm)
JP2	złącze		złącze kolkowe męskie x3 (raster 2,54 mm)
X1	złącze		ARK 500/2
R1	rezystor	220 $\Omega$	0207
R2	rezystor	120 k $\Omega$	0207
R3	rezystor	5,6 k $\Omega$	0207
R4	potencjometr	10 k $\Omega$	RM-065
R5	rezystor	33 k $\Omega$	0207
R6	rezystor	680 k $\Omega$	0207
R7	rezystor	220 $\Omega$	0207
R8	rezystor	100 k $\Omega$	0207
R9	rezystor	330 $\Omega$	0207
R10	rezystor	10 $\Omega$	0207



## 6. Wykonanie i pomiary

Wszystkie fotografie i filmy zebrane z wykonywania, prób wykonywania oraz pomiarów prototypu i pcb dostępne są na [dysku google](#). Kluczowe zdaniem autora fotografie zawarte zostały w sprawozdaniu.

Topologia połączeń z rysunku 25. oraz warstwa opisowa z rysunku 26. zostały wydrukowane z użyciem drukarki laserowej na papierze kredowym. Przygotowany laminat został docięty do wymiarów wydruków oraz oszlifowany czyszcikiem do laminatu, w celu usunięcia zanieczyszczeń laminat został wymyty wodą z mydłem oraz przepłukany alkoholem izopropylowym.



Rys. 27. Przygotowany wydruk oraz docięty laminat

W czasie schnięcia laminatu rozrobiony został roztwór alkoholu izopropylowego z acetonem w proporcji 1:1. Po przygotowaniu roztworu wydruk topologii został przyłożony do pokrytej metalizacją powierzchni płytki, zwilżony roztworem, a następnie każda ścieżka była dociskana do laminatu aż do czasu odparowania roztworu. Po odparowaniu laminat został umieszczony w wodzie z dodatkiem mydła do czasu rozmiękczenia papieru. Następnie papier został delikatnie odklejony od płytki pozostawiając toner na laminacie.

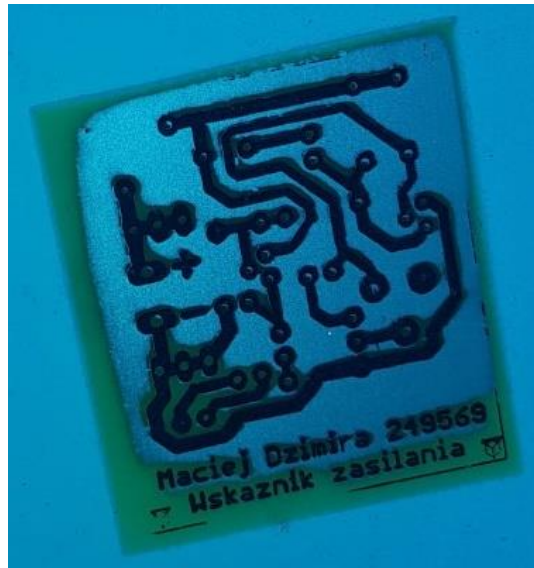


Rys. 28. Przenoszenie tonera z papieru kredowego na laminat z wykorzystaniem roztworu



Rys. 29. Toner przeniesiony na laminat

Po odklejeniu papieru i optycznej inspekcji ścieżek na płytce nie była wymagana żadna korekta z wykorzystaniem permanentnego pisaka. Zdecydowano o rozpoczęciu trawienia płytki. Do trawienia wykorzystano używany już wcześniej roztwór nadsiarczynu sodu z wodą. Ze względu na trawienie w temperaturze pokojowej i „zużycie” roztworu całkowity czas trawienia warstwy miedzi o grubości 35  $\mu\text{m}$  wyniósł około 2 godzin.

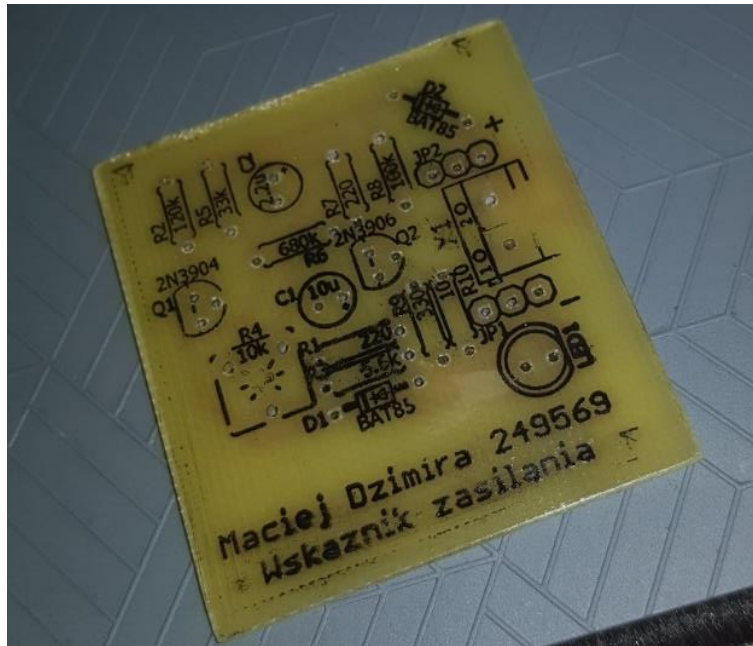


Rys. 30. Trawienie niezasłoniętej miedzi w rozpuszczonym w wodzie nadsiaczanie sodu

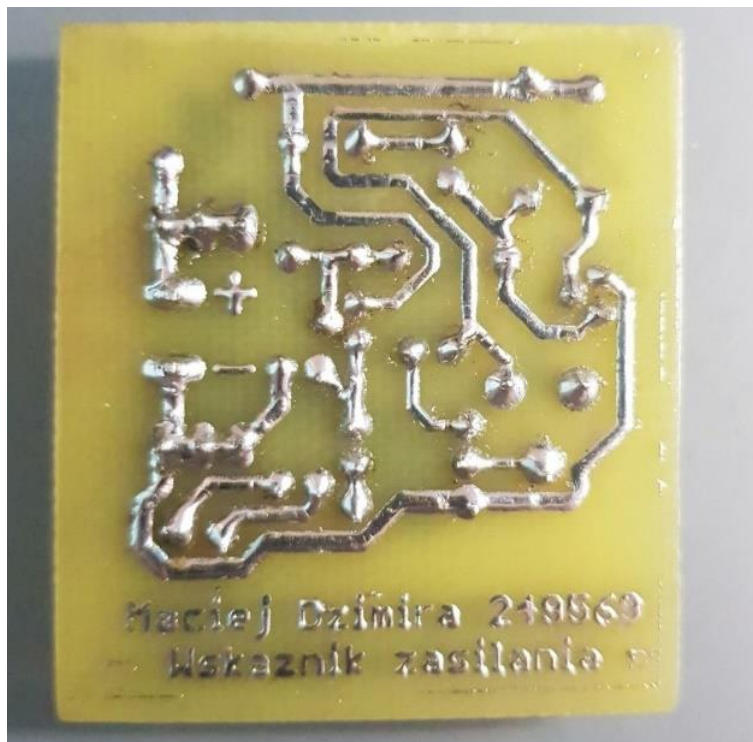
Po wytrawieniu powierzchni miedzi niezasłoniętej tonerem i oczyszczeniu powierzchni laminatu przystąpiono do inspekcji powstałych ścieżek. Po stwierdzeniu braku defektów przystąpiono do wywiercenia otworów w celu umieszczenia w nich komponentów. Po wywierceniu otworów zarówno otwory, jak i krawędzie płytki zostały wygładzone papierem ściernym. Powstałe otwory wykorzystano do precyzyjnego dopasowania warstwy opisowej i dokonano ponownego przeniesienia tonera z papieru na laminat z użyciem roztworu. Przeniesiony toner zabezpieczono lakierem do pcb. Następnie przystąpiono do umieszczenia komponentów w otworach zgodnie z warstwą opisową i przylutowano wszystkie wyprowadzenia do pól lutowniczych.



Rys. 31. Wytrawiona płytką z przewierconymi otworami na komponenty



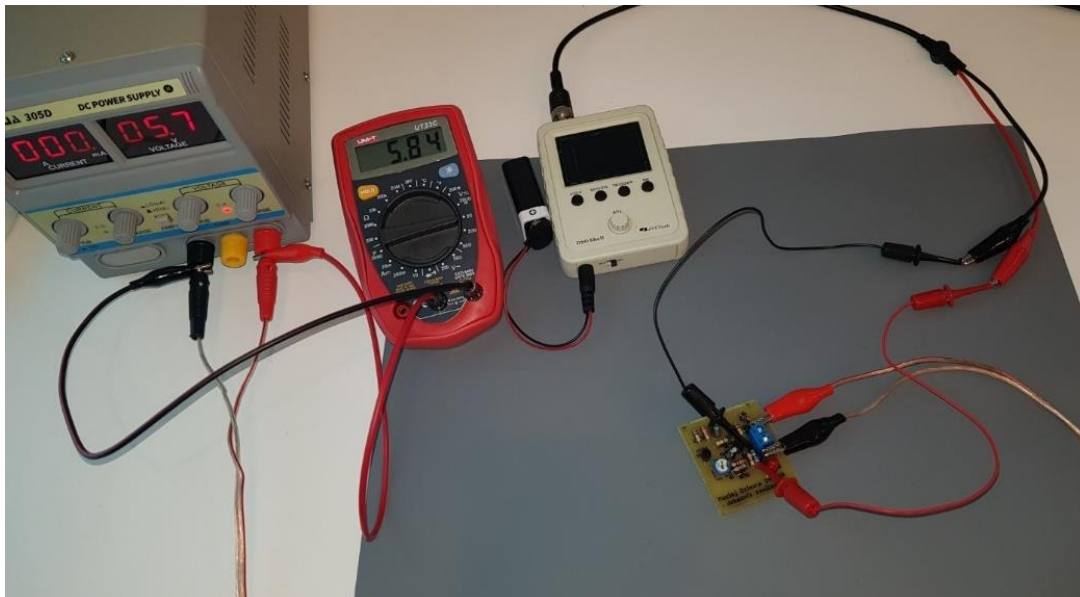
Rys. 32. Płytkę po przeniesieniu warstwy opisowej analogiczną metodą jak na rysunku 28.



Rys. 33. Umieszczone i przylutowane komponenty do laminatu



Rys. 34. Zmontowany układ

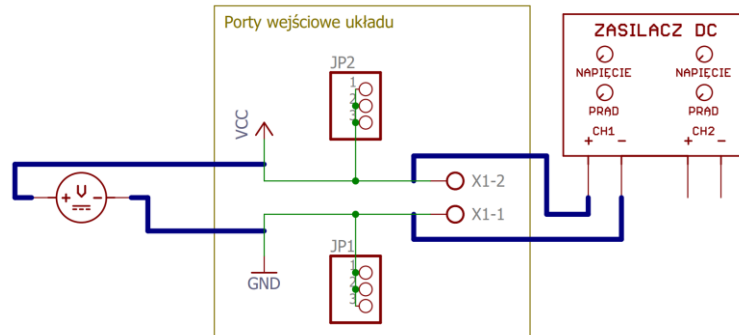


Rys. 35. Zdjęcie stanowiska pomiarowego (pomiar prądu diody)

W celu wykonania teoretycznie dokładniejszych pomiarów oscyloskopem DSO150 w stosunku do pomiarów wykonywanych na prototypie układu, zdecydowano się na zaktualizowanie oprogramowania oscyloskopu do najnowszej dostępnej. Nie poprawiło to jednak dokładności pomiarów częstotliwości sygnału ani częstotliwość próbkowania samego oscyloskopu.

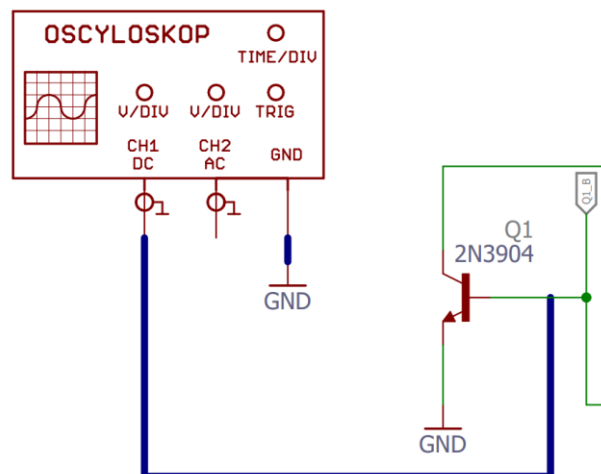
## 6.1 Schematy pomiarowe

Schemat pomiarowy z rysunku 36. został wykorzystany do pomiaru wartości napięcia zasilającego układ.

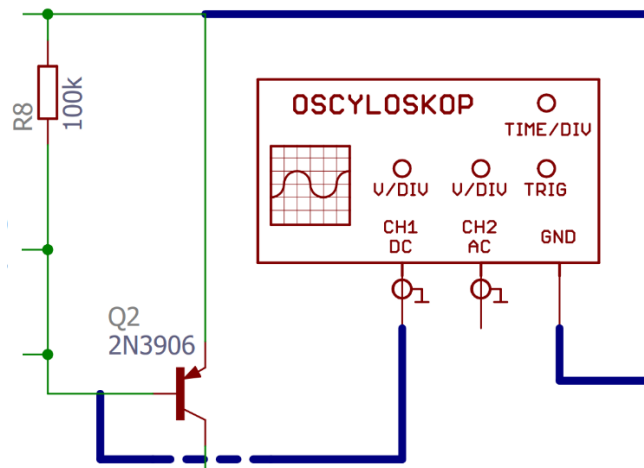


Rys. 36. Sposób zasilenia układu i pomiaru napięcia zasilającego dla rys. 37-39.

Ze względu na sposób działania układu, zdecydowano, że najistotniejszymi parametrami do zarejestrowania będzie przebieg napięć baza-emiter na obu tranzystorach w układzie. Rozważano dodanie przebiegów występujących na kondensatorach C1 i C2, jednak zdecydowano, że przebiegi napięć na kondensatorach nie wniosą nowych informacji na temat działania układu, i przebiegi na tranzystorach są wystarczające.

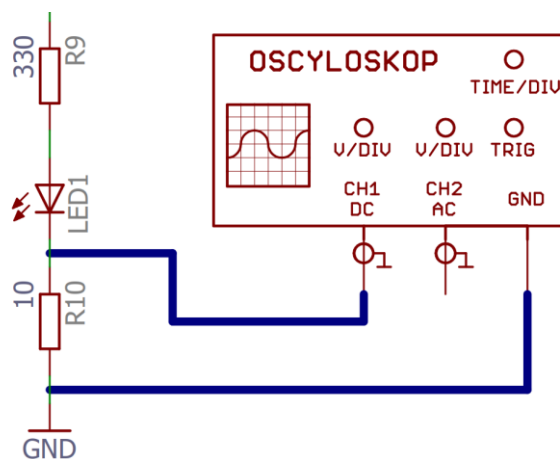


Rys. 37. Pomiar napięcia baza-emiter tranzystora Q1



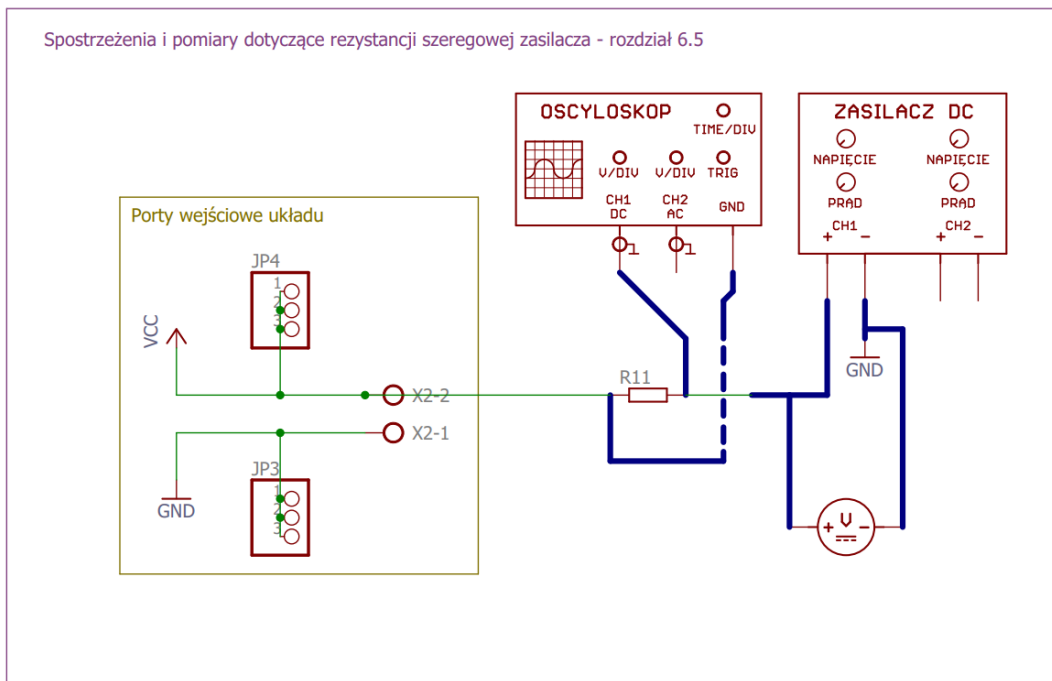
Rys. 38. Pomiar napięcia baza-emiter tranzystora Q2

Pomiar prądu w gałęzi diody wykonano metodą techniczną, analogicznie jak opisano to w rozdziale dotyczącym prototypu. Do gałęzi diody dołączono szeregowo rezystor pomiarowy  $10 \Omega$  i za pomocą oscyloskopu wykonano pomiar spadku napięcia między jego wyprowadzeniami. Następnie zgodnie z przekształconym prawem Ohma, na podstawie odczytanego napięcia i znanej w przybliżeniu rezystancji (uznano, że tolerancja 1% wartości rezystora może zostać pominięta w obliczeniach – przed montażem sprawdzano prawidłowość działania każdego komponentu) wyznaczono prąd w gałęzi LED.



Rys. 39. Pomiar natężenia prądu gałęzi LED z wykorzystaniem spadku napięcia na rezystorze pomiarowym

Na rys. 40. przedstawiono układ do pomiaru wpływu rezystancji szeregowej baterii na częstotliwość pracy układu. Pomiar nie był pierwotnie planowany, jego celem było sprawdzenie zachowania układu przy zwiększeniu rezystancji szeregowej zasilacza poza zakresem przewidywanym w symulacjach (wykorzystano rezystory 1 k $\Omega$  i 10 k $\Omega$ ), i pozwolił na odkrycie niezauważonej wcześniej zależności. Pomiar był wynikiem nieudanej próby pomiaru prądu zasilającego układ spowodowanej trudnościami oscyloskopu z akwizycją przebiegów impulsowych.



Rys. 40. Pomiar wpływu rezystancji szeregowej na częstotliwość pracy układu



## 6.2 Pomiary dotyczące pracy tranzystorów Q1 i Q2

Dokładniejsze dobranie zakresów pomiarowych oraz postawy czasu pozwoliło na precyzyjniejsze przedstawienie przebiegów napięć na złączach baza-emiter obu tranzystorów. Zebrane przebiegi odzwierciedlają uzyskane w symulacji oraz przypominają zebrane podczas pomiarów prototypu. Przebiegi zostały zebrane dla napięcia zasilającego równego 12 V i maksymalnej nastawy potencjometru wynoszącej w przybliżeniu 10 k $\Omega$ . Zbieżność przebiegów z symulacją świadczy o poprawnym wykonaniu i działaniu układu.



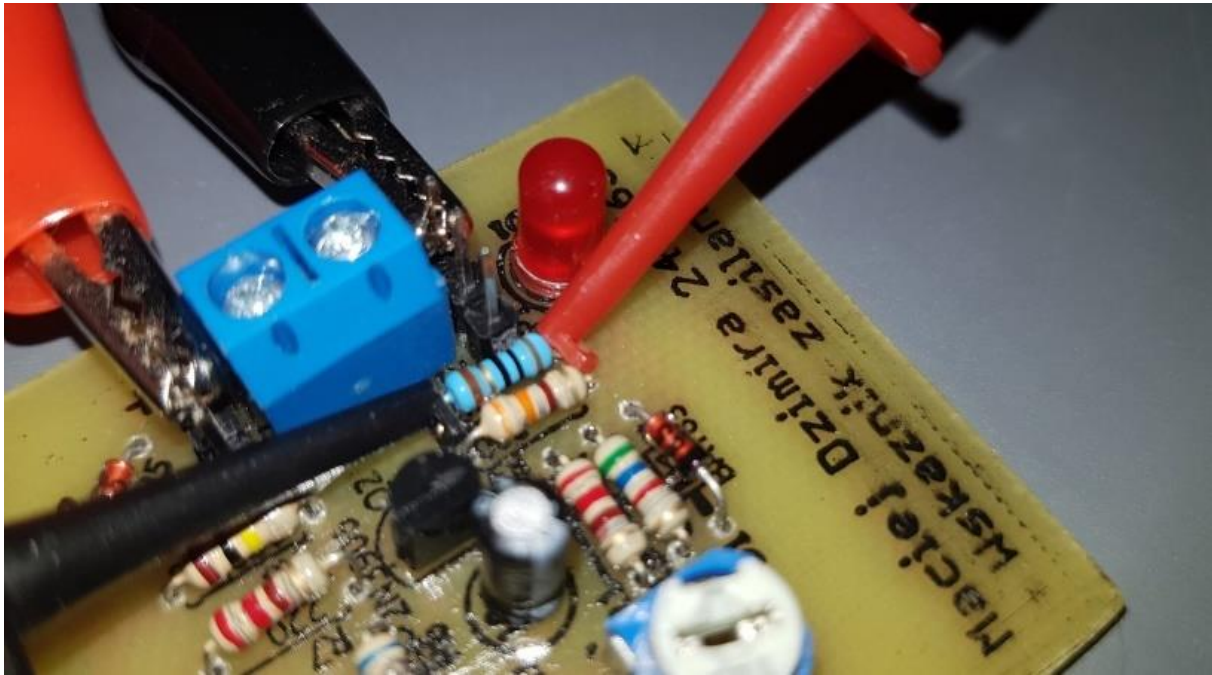
Rys. 41. Przebieg napięcia baza-emiter tranzystora Q1



Rys. 42. Przebieg napięcia baza-emiter tranzystora Q2

### 6.3 Pomiary dotyczące pracy diody LED

Podobnie jak przy analizie prototypu, do pomiaru prądu diody wykorzystany został dołączony w gałąź diody rezystor pomiarowy o rezystancji wynoszącej  $10\ \Omega$ . Dla każdego z ustalonych napięć zasilających zanotowany został spadek napięcia na rezystorze, a następnie, zgodnie z przekształconym prawem Ohma został wyliczony prąd płynący przez diodę LED.

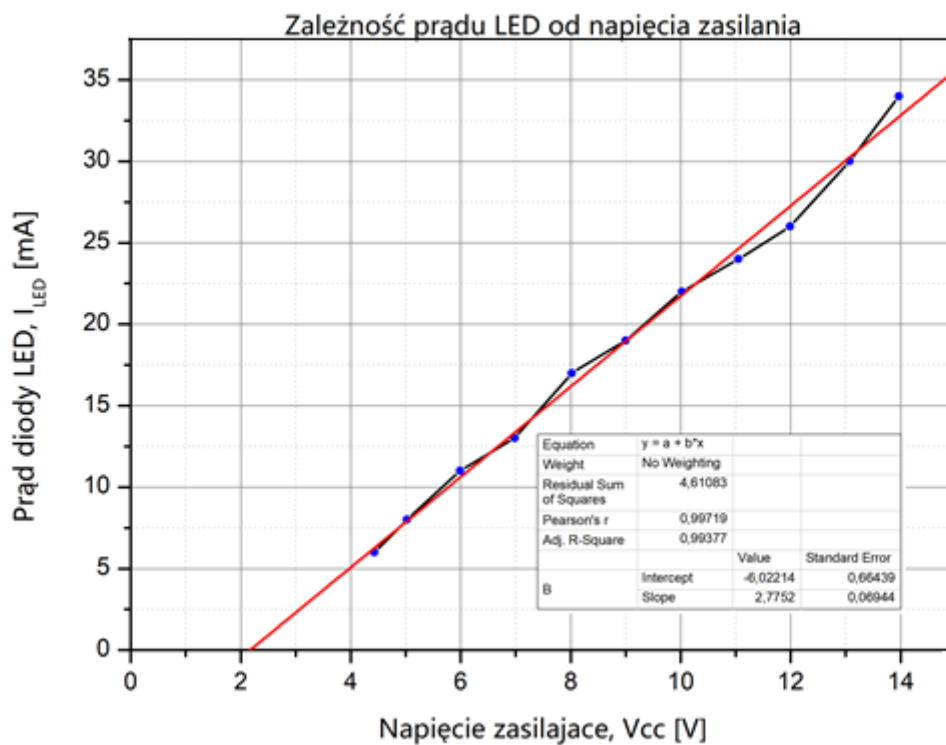


Rys. 43. Sposób pomiaru spadku napięcia na rezystorze  $10\ \Omega$

W tabeli 4. zestawiono wartość prądu diody LED w funkcji wartości napięcia zasilającego, natomiast na rys. 44. przedstawiono graficzną interpretację tej zależności.

Tabela 4. Oszacowanie prądu diody LED na podstawie odczytu spadku napięcia na rezystorze pomiarowym

Napięcie zasilające, VCC [V]	Prąd diody, I <sub>LED</sub> [mA]
4,43	6
5,02	8
5,99	11
6,98	13
8,02	17
9,00	19
10,02	22
11,05	24
11,99	26
13,07	30
13,97	34



Rys. 44. Zależność prądu LED od napięcia zasilania (na podstawie tabeli 4.)

Charakterystyka przedstawiona na rysunku 44. cechuje się względnie dużą liniowością, podobnie jak oczekiwana charakterystyka uzyskana na podstawie symulacji. Ponownie, potwierdza to, że układ może z dużym powodzeniem działać jako detektor, pomimo tego, że intensywność świecenia diody LED jest dość trudna do wykrycia przez ludzkie oko. Uzyskanie liniowej charakterystyki zbieżnej z tą uzyskaną w symulacji ponownie potwierdza, że układ wykonany został poprawnie.

Dane w tabeli 5. zostały zebrane na podstawie nagranych filmów dotyczących działania układu (dostępne na [dysku google](#)). Częstotliwość została wyznaczona przez podzielenie ilości impulsów przez długość filmu.

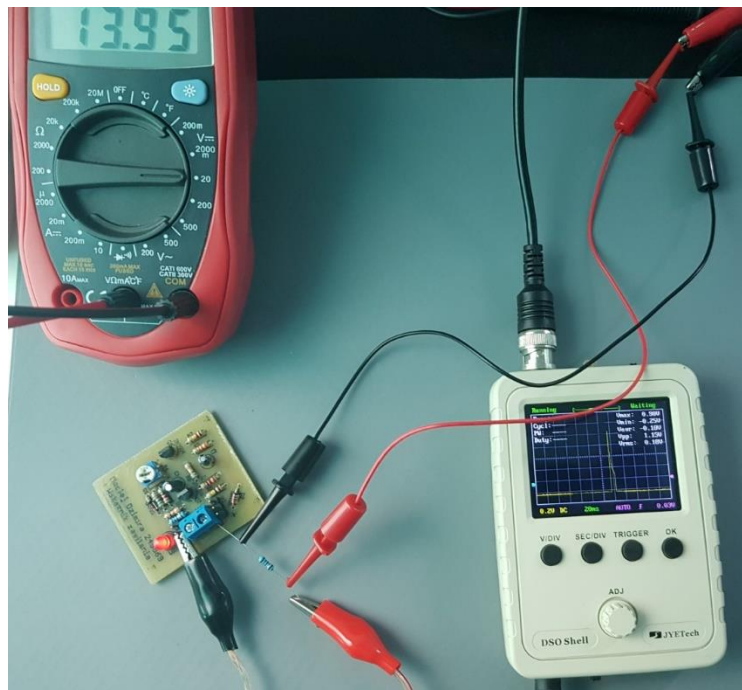
Tabela 5. Częstotliwość generowanych impulsów w zależności od napięcia zasilającego

Napięcie zasilające, VCC [V]	Ilość impulsów	Długość filmu	Częstotliwość, f [Hz]
$5 \pm 0,1$	47	32 s	1,46875
$6 \pm 0,1$	119	76 s	1,56579
$8 \pm 0,1$	111	70 s	1,58571
$10 \pm 0,1$	113	72 s	1,56944
$12 \pm 0,1$	116	76 s	1,54667

Częstotliwość przedstawiona w tabeli 5. jest zbieżna z uzyskaną w symulacji układu. Metoda wyliczenia częstotliwości polegająca na zliczaniu impulsów w danym czasie na zarejestrowanym nagraniu na pewno jest dokładniejsza niż częstotliwości odczytywane za pomocą innych metod. Zgodnie z wcześniejszą obserwacją, zakres zmian częstotliwości jest względnie niewielki, ponadto nie przebiega liniowo. Nieliniowa zmiana częstotliwości, pomimo, że symulacja wykazała liniową zależność (choć zmiana była rzędu 0,2 Hz), może mieć związek z rezystancją wewnętrzną źródła zasilania, co zostanie szczegółowo rozpatrzone i wytłumaczone w dalszych podrozdziałach.

## 6.4 Pomiary dotyczące pobieranej mocy z zasilacza

W celu wyznaczenia mocy pobieranej przez zrealizowany układ przystąpiono do pomiarów poboru prądu z zasilacza, sposób pomiaru prądu analogiczny jak w przypadku pomiaru prądu płynącego przez diodę. Do wejścia układu dołączono szeregowy rezystor  $10\ \Omega$ , a sondy oscyloskopu zostały dołączone do wyprowadzeń rezystora, następnie dla określonej nastawy napięcia na zasilaczu odczytywana była wartość napięcia w szczycie. Kolejno planowano wyliczyć prąd zasilający układ z przekształconego prawa Ohma.

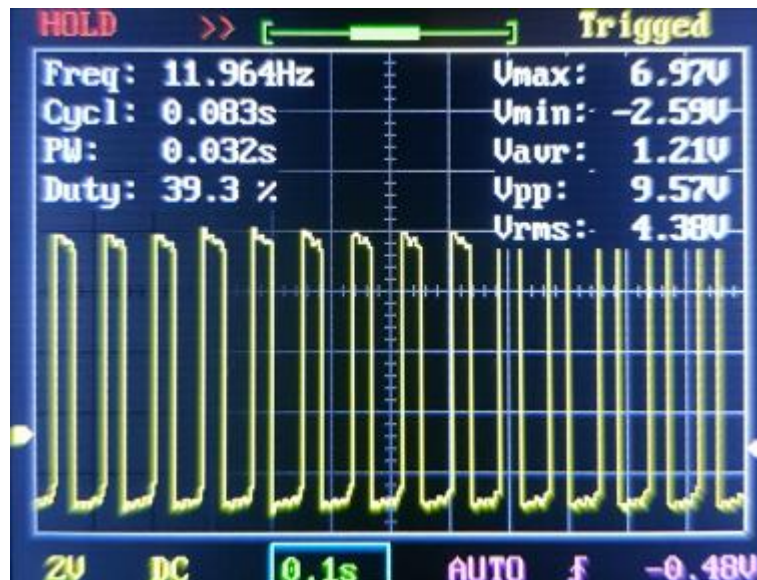


Rys. 45. Przykład próby pomiaru prądu zasilającego układ na rezystorze pomiarowym  $10\ \Omega$

Niestety, ze względu na ograniczone możliwości pomiarowe oscyloskopu, nie udało się zebrać rzeczywistych danych dotyczących przebiegu prądu w układzie. Spadek napięcia na rezystorze przy przykładowym napięciu zasilania  $12\ \text{V}$  oscylował w granicy od  $0,5\ \text{V}$  do  $0,9\ \text{V}$ , oczekiwana wartość powinna wynosić około  $1,1\ \text{V}$ . Zastanawiającym był fakt, że w przypadku pomiaru prądu diody nie wystąpiły aż takie rozbieżności (występowały niewielkie różnice, ale uśrednienie pozwalało uzyskać przełożenie na prąd zbliżone z symulacją). Próba zwiększania wartości rezystora pomiarowego ujawniła fakt dotyczący wpływu rezystancji szeregowej zasilania na częstotliwość pracy układu.

## 6.5 Spostrzeżenia i pomiary dotyczące rezystancji szeregowej zasilacza

W trakcie prób pomiaru poboru prądu z zasilacza zdecydowano się na dołączenie do wejścia szeregowego rezystora  $1\text{ k}\Omega$ . Bezpośrednio po zasileniu układu zaobserwowano zjawisko, które nie ujawniło się w trakcie symulacji wpływu rezystancji szeregowej źródła zasilania na układ. W symulacji analizowany był zakres jedynie do  $100\ \Omega$  zakładając, że układ nigdy nie będzie pracował z rezystancją szeregową większą niż  $10\ \Omega$ . Po dołączeniu szeregowego rezystora pomiarowego  $1\text{ k}\Omega$  częstotliwość impulsów wzrosła do  $3,5\text{ Hz}$ . Zwiększając wartość rezystancji rezystora do  $10\text{ k}\Omega$  częstotliwość świecenia wyniosła około  $12\text{ Hz}$ . Pomimo zmian, przy stałej rezystancji i zmianach napięcia zasilającego częstotliwość generowanych impulsów była względnie stała i nie zmieniała się w zauważalnym zakresie.



Rys. 46. Przebieg napięcia na rezystorze pomiarowym  $10\text{ k}\Omega$



Rys. 47. Przebieg napięcia na rezystorze pomiarowym 1 k $\Omega$

Charakter zmian częstotliwości w tabeli 5. najprawdopodobniej wynika z zasady działania zasilacza laboratoryjnego. Zasilacz wyposażony jest w odczepy, które przełączając się mogą wpływać na jego rezystancję szeregową, a to może przekładać się na brak liniowych zmian częstotliwości podczas pomiarów. Bezpośrednim rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie zasilacza, którego rezystancja szeregową nie zmieniałaby się w opisywany sposób, co umożliwiłoby bardziej wiarygodny pomiar zmian częstotliwości. Niemniej jednak, zakres zmian częstotliwości można uznać za znikomy i trudny do zaobserwowania. Podsumowując, częstotliwość z jaką włącza się dioda nie jest parametrem wyznaczającym poziom napięcia zasilania, a jedynie informuje użytkownika o fakcie zasilenia układu (przed przekroczeniem napięcia progowego dioda będzie wyłączona, a po jego przekroczeniu dioda będzie migać z praktycznie stałą częstotliwością).

## 7. Wnioski

Wykonany układ zaczerpnięty ze strony [1], po kilku modyfikacjach usprawniających jego pracę okazał się być w pełni funkcjonalny i może być z powodzeniem stosowany w praktycznie każdym projekcie.

Ze względu na zastosowanie tranzystorów bipolarnych i sposób działania układu efektywność energetyczna nie jest duża. Jedyne około 10% mocy pobieranej przez układ odpowiedzialne jest za świecenie diody, która pełni funkcję informacyjną. Być może przeprojektowanie układu na wersję unipolarną lub zaprojektowanie go od podstaw podniosłoby efektywność energetyczną.

Posiadany oscyloskop DSO150 mini, choć z powodzeniem wykorzystywany we wcześniejszych projektach i pomiarach układów elektronicznych, ukazał swoje wady związane z niską częstotliwością próbkowania sygnałów wejściowych – krótkotrwałe impulsy były przez oscyloskop nierejestrowane, a jeżeli trwały odpowiednio długo to czasami ich podgląd nie odzwierciedlał realnych przebiegów.

Na podstawie subiektywnych obserwacji autora, metoda przenoszenia tonera z kartki papierowej na laminat z wykorzystaniem roztworu alkoholu izopropylowego z acetonem w przypadku mniejszych płytek typowo daje większe szanse na poprawne przeniesienie topologii ścieżek bez konieczności korekt. Kolejną zaletą jest eliminacja ryzyka poparzeń od nagrzanego żelazka lub laminatu.



## Oświadczenie o samodzielności pracy

Oświadczam, że projekt został sprawdzony, jest kompletny i spełnia wymagania projektowe. Oświadczam również, że został wykonany w pełni samodzielnie.

## Literatura i źródła wiedzy

[1] <http://www.hobby-circuits.com/circuits/power-supply/battery-charger/688/flashing-led-battery-status-indicator-circuit> [dostęp 2.03.2021].

[2] M. Rusek, J. Pasierbiński, *Elementy i układy elektroniczne w pytaniach i odpowiedziach*, WNT, Warszawa 1997, s. 303-323.

[3] <https://www.youtube.com/watch?v=Ll-Jye7EP3g> [dostęp 5.03.2021].

[4] <https://www.fuw.edu.pl/wo/data/prac-fiz-multiwibr-asta.pdf> [dostęp 6.03.2021].