

STRESZCZENIE

Celem projektu inżynierskiego było zaprojektowanie i wykonanie testera elementów półprzewodnikowych, którego zadaniem jest rozpoznawanie elementów półprzewodnikowych, podłączanych do urządzenia przez użytkownika. Urządzenie zostało wzbogacone o pomiar rezystancji i pojemności. Tester ma umożliwić szybką, automatyczną identyfikację elementów bez konieczności wykonywania przez użytkownika ręcznych pomiarów za pomocą multimetru.

Zasada działania urządzenia polega na wykorzystaniu mikrokontrolera ATmega8A, jako jednostki sterującej i pomiarowej oraz zastosowaniu grupy rezystorów, które poszerzają możliwości mikrokontrolera. Dzięki takiej konfiguracji tester rozpoznaje elementy elektroniczne na podstawie ich charakterystycznych cech oraz zasady działania.

Zakres pracy przy tworzeniu testera obejmował zaprojektowanie płytki drukowanej i zmontowanie urządzenia, a następnie jego uruchomienie. Po wykonaniu warstwy sprzętowej został napisany program, który korzystając z dostępnych zasobów, będzie w stanie jednoznacznie określić badany element oraz ewentualnie jego parametry. Proces tworzenia oprogramowania był przeplatany z procesem testowania, w którym była sprawdzana poprawność działania urządzenia.

Wykonany tester elementów półprzewodnikowych spełnia swoje zadanie. Pomimo prostego układu pomiarowego urządzenie jest w stanie wykryć wiele różnych elementów elektronicznych.

Słowa kluczowe: tester, elementy półprzewodnikowe, mikrokontroler

Dziedzina nauki i techniki, zgodnie z wymogami OECD: elektrotechnika i elektronika

ABSTRACT

The aim of the engineering design was projecting and constructing a semiconductor devices tester, which can identify semiconductor devices connected to the tester by user. The device was extended by resistance and capacity measurement. The tester task is fast and automatic recognition the tested electronic component, without necessity of manual measurements with multimeter by the user.

The principles of work the semiconductor tester is based on using the microcontroller ATmega8A, which works as a controlling and measurement unit, and using the group of resistors, which extend the microcontroller capabilities. This hardware configuration allows to identify electronic components based on their characteristics features.

The scope of the work in creating the semiconductor devices tester includes design of printed circuit board and assemble the device. After accomplished a hardware layer, there was a need to write the program on the microcontroller, which takes advantage of available resources. The program must be able to clearly define the examined component. The process of writing the code was being executed parallel with the process of testing tester operation.

The created semiconductor devices tester fulfils all its tasks. Despite its simplicity the device can identify many electronic components.

Keywords: tester, semiconductor devices, microcontroller

SPIS TREŚCI

Wykaz oznaczeń i skrótów	6
1. Wstęp i cel pracy	7
2. Testowane elementy	10
2.1 Rezystor	10
2.2. Kondensator	11
2.3. Dioda	11
2.4. Tranzystory bipolarne NPN i PNP	12
2.5. Tranzystory MOSFET z kanałem wzbogaconym typu n i typu p	13
2.6. Tyristor	14
3. System pomiarowy	16
3.1. Układ testowy	16
3.2. Mikrokontroler	18
3.3. Układ zasilania	21
3.4. Wyświetlacz	22
4. Opis testowania elementów	24
4.1. Badanie rezystancji	24
4.2. Badanie pojemności	27
4.3. Badanie diody	30
4.4. Badanie tranzystorów bipolarnych NPN i PNP	31
4.5. Badanie tranzystorów MOSFET z kanałem wzbogaconym typu n i typu p	33
4.6. Badanie tyrystora	34
5. Wyniki pomiarów	36
6. Podsumowanie	40
Wykaz literatury	41
Wykaz rysunków	42
Wykaz tabel	43
Dodatek A	44
Dodatek B	45
Dodatek C	47
Dodatek D	48
Dodatek E	49

WYKAZ OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

R	– rezystancja [Ω]
U	– napięcie [V]
I	– natężenie prądu [A]
C	– pojemność [F]
A/C	– przetwornik analogowo-cyfrowy
Q	– ładunek elektryczny [C]
U_R	– napięcie przebicia diody [V]
U_F	– napięcie przewodzenia diody [V]
I_D	– prąd drenu [A]
U_{GS}	– napięcie dren-źródło [V]
U_P	– napięcie progowe [V]
U_{DS}	– napięcie dren-źródło [V]
I/O	– linie wejścia/wyjścia
f_{ADC}	– częstotliwość sygnału zegarowego przetwornika A/C [Hz]
f_{CLK}	– częstotliwość sygnału zegarowego mikrokontrolera [Hz]
P	– wartość preskalera
R_X	– badana rezystancja [Ω]
U_X	– napięcie na badanej rezystancji [V]
τ	– stała czasowa [s]
K	– wzmacnienie [V]
f_l	– częstotliwość licznika [Hz]
I	– wartość licznika
R_{pom}	– pomierzona rezystancja [$k\Omega$]
C_{pom}	– pomierzona pojemność [μF]

1. WSTĘP I CEL PRACY

Obecnie na rynku znajduje się wiele elementów elektronicznych, które mają takie same obudowy. Pomimo stosowania na obudowach oznaczeń, które zawierają numery identyfikacyjne elementu i nazwę producenta, użytkownik musi posiadać notę katalogową danego elementu, aby móc określić jego rodzaj, podstawowe parametry pracy, położenie poszczególnych wyprowadzeń. Ze względu na szeroki wybór dostępnych elementów elektronicznych np. elektronik – amator nie jest w stanie zapamiętać wszystkich stosowanych oznaczeń.

Oczywiście najprostszą metodą określenia rodzaju elementu elektronicznego jest sprawdzenie jego noty katalogowej. Znalezienie odpowiedniego dokumentu zajmuje trochę czasu, ale jest to najpewniejsze źródło informacji. Czasami jednak nie można skorzystać z tego sposobu, ponieważ opis na obudowie został starty, albo dokumentacja elementu nie jest dostępna. W takim przypadku można posłużyć się multimetrem i zbadać posiadany element. Jednak ta metoda jest czasochłonna.

Najszybszą metodą identyfikacji elementu elektronicznego wydaje się zastosowanie testera elementów półprzewodnikowych. Tester jak sama nazwa wskazuje, służy do testowania elementów półprzewodnikowych, rozpoznawania ich. Testowanie elementu polega na umieszczeniu elementu w gnieździe testowym urządzenia i uruchomieniu pomiarów za pomocą przycisku. Po zakończeniu badań, tester informuje użytkownika o wyniku pomiaru na przykład poprzez wyświetlenie informacji na wyświetlaczu.

Dodatkowo takie urządzenie można wzbogacić o badanie innych elementów elektronicznych nie tylko półprzewodnikowych. Oprócz identyfikacji elementu tester elementów półprzewodnikowych może również mierzyć podstawowe parametry elementów. Dokładność takich pomiarów zależy od zastosowanego układu testowego, ale pozwala uzyskać przybliżone informacje o parametrach badanego elementu. Dodatkową funkcją urządzenia może być wykrywanie położenia pinów badanego elementu, przez co użytkownik nie musi zaglądać do noty w celu sprawdzenia położenia wyprowadzeń.

Tester elementów półprzewodnikowych znajduje zastosowanie w warsztatach elektronicznych hobbystów, gdzie często wykorzystuje się elementy z odzysku. Pomaga początkującym elektronikom w szybkiej identyfikacji elementu lub służy do sprawdzenia sprawności elementu. Pierwszym etapem podczas projektowania testera było zapoznanie się z dostępnymi obecnie rozwiązaniami tego problemu. Wszystkie rozwiązania znalezione na forach internetowych bazowały na projekcie [1], którego autorem jest Markus Frejek. Jego układ składa się z mikrokontrolera ATmega8, układu testowego, wyświetlacza LCD i układu zasilania. Mikrokontroler został wykorzystany do pobudzania badanego elementu, pomiaru napięć na pinach testowych i określania, na podstawie zebranych danych, typu elementu. W celu ograniczenia prądów pobudzających badany element, zastosowano grupę rezystorów, z której

wyberany jest odpowiedni do aktualnie przeprowadzanego pomiaru. Ponadto układ potrafi pomierzyć podstawowe parametry badanych elementów. Wynik jest wyświetlany na wyświetlaczu LCD.

Kolejnym projektem [2], stworzonym przez Karla-Hainza Kübbelera jest tester wzorowany na układzie Markusa. Zasada pomiaru nie różni się od tej wykorzystanej w pierwowzorze, tzn. układem sterująco-pomiarowym jest mikrokontroler, który wykorzystuje grupę rezystorów do wysterowania pinów testowanego elementu. Układ został rozwinięty o dodatkowe elementy, które powodują odłączenie zasilania po dokonaniu pomiaru, aby ograniczyć pobór mocy przez urządzenie.

Następnym przykładem rozwiązywania problemu, jest układ, przedstawiony na łamach Elektroniki Praktycznej, którego autorem jest Ryszard Szymaniak [3]. Koncepcja ta różni się od poprzednich, ponieważ posiada oddzielne złącza testowe dla każdego rodzaju z badanych elementów. Powoduje to, że układ nie służy do identyfikowania elementów, jak poprzednie rozwiązania, tylko do testowania ich parametrów. Układ oparty został na mikrokontrolerze 89C51 firmy Atmel, który współpracuje z wieloma układami peryferyjnymi wspomagającymi pomiary parametrów. Wyniki pomiarów wyświetlane są na wyświetlaczu LCD.

Z przedstawionych rozwiązań postanowiono bazować na układzie zaprojektowanym przez Markusa Frejeka. Zrezygnowano z rozbudowy układu zaproponowanej przez Kübbelera, w celu ułatwienia testowania, rozwijania urządzenia. Dodatkowo twórca informował, że może zająć potrzeba zamiany niektórych elementów, w celu zapewnienia poprawnego funkcjonowania. Natomiast projekt testera zaprezentowany w czasopiśmie Elektronika Praktyczna nie posiada funkcji rozpoznawania elementów, co dla początkujących elektroników jest bardzo przydatne.

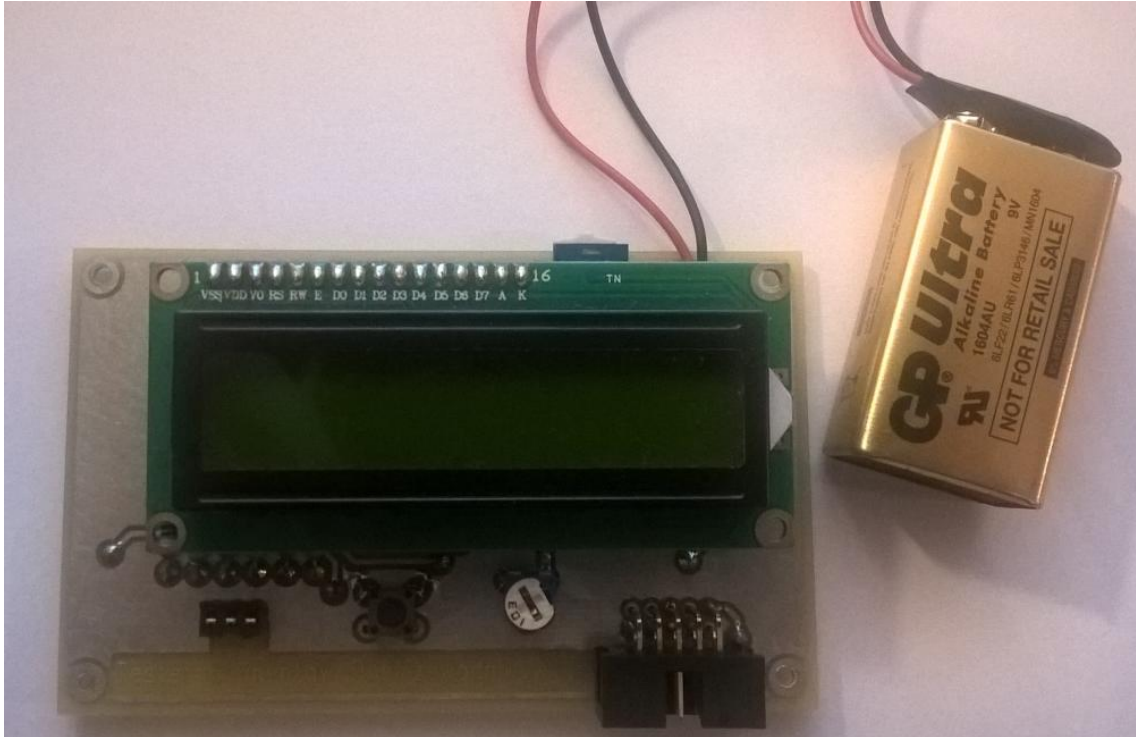
Projektując tester elementów elektronicznych postawiono na jego prostotę, dzięki czemu urządzenie jest jeszcze bardziej przyjazne dla początkujących elektroników. Część hobbystów elektroniki zajmuje się samodzielnym przygotowywaniem płytek, więc wytrawienie dość prostej płytki dwustronnej nie powinno stanowić dla nich problemu. Dodatkowo zastosowano elementy, które w większości można znaleźć w domowych warsztatach. Prosta budowa urządzenia, brak elementów powierzchniowych ułatwi montaż testera i naprawę ewentualnych usterek.

Schemat testera elementów półprzewodnikowych został zaprojektowany w programie wspomagającym projektowanie urządzeń elektronicznych. Ostateczny układ przedstawionego w tej pracy testera, którego schemat znajduje się w **Dodatku A**, składa się z:

- mikrokontrolera ATmega8A, który wykorzystywany jest jako jednostka sterująca i pomiarowa,
- układu testowego, czyli grupy rezystorów wykorzystywanych do pomiarów oraz pinów testowych,

- układu zasilania,
- wyświetlacza, który służy do prezentacji wyników testowania.

Kolejnym etapem tworzenia testera elementów półprzewodnikowych było zaprojektowanie płytki drukowanej, na podstawie stworzonego wcześniej schematu. Projekt gotowej mozaiki, znajduje się w **Dodatku D**. Po przygotowaniu projektu płytki drukowanej, został on przekazany do firmy zajmującej się ich produkcją. Następnie urządzenie zostało zmontowane. Wygląd zmontowanego urządzenia przedstawiono na rys. 1.1.



Rys. 1.1. Złożony tester elementów półprzewodnikowych

Ostatnim etapem tworzenia warstwy sprzętowej było przetestowanie działania poszczególnych elementów układu. Sprawdzono poprawność połączeń na płytce oraz podstawowe parametry elektryczne. Testy wykazały, że urządzenie od strony sprzętowej działa prawidłowo.

2. TESTOWANE ELEMENTY

Podczas projektowania urządzenia elektronicznego bardzo ważne jest, aby zapoznać się z realizowanym zagadnieniem, zebrać wszelkie potrzebne informacje, które przydadzą się podczas dalszych prac projektowych. W przypadku projektowania testera elementów półprzewodnikowych, do takich wstępnych prac zaliczało się zapoznanie z testowanymi elementami.

Każdy element posiada charakterystyczny sposób działania. Jedne wzmacniają sygnał, inne gromadzą ładunek elektryczny, a jeszcze inne po prostu ograniczają prąd. Testowanie elementów polegało właśnie na sprawdzeniu jak zachowuje się podłączony element. Czasami sprawdzenie sposobu działania, nie dawało jednoznacznych wyników. Spowodowane jest to tym, że niektóre elementy działają bardzo podobnie, a do ich rozróżnienia należy się zgłębić bardziej w ich budowę i znaleźć cechy, którymi się od siebie różnią.

2.1 Rezystor

Rezystor jest podstawowym elementem obwodów elektronicznych. Charakteryzuje się oporem elektrycznym – rezystancją, którą można opisać wzorem (2.1.1). Przedstawiona zależność jest nazywana prawem Ohma. Z tej zależności wynika, że rezystor jest elementem, który służy do ustalania wartości prądów i napięć w obwodach elektrycznych [4].

$$R = U/I \quad (2.1.1)$$

gdzie:

R – rezystancja [Ω]

U – napięcie [V]

I – natężenie prądu [A]

Rezystory są produkowane z różnych materiałów. Najbardziej popularne są rezystory węglowe, w których materiałem rezystancyjnym jest napyłona warstwa węgla. Dużą zaletą tych rezystorów jest to, że są tanie i łatwe w produkcji. Innym popularnym typem rezystorów są rezystory metalowe. Rolę warstwy rezystancyjnej pełni napyłony metal. Takie oporniki mają mniejsze szumy termiczne oraz mniejszą tolerancję, są dokładniejsze [5].

Rezystory charakteryzują się nie tylko rezystancją, ale także posiadają wewnętrzną pojemność i indukcyjność, które zaczynają odgrywać dużą rolę przy coraz większych częstotliwościach. W przypadku testera można przyjąć, że częstotliwości pracy są niskie. Dodatkowo większość elementów jest głównie testowana w obwodach prądu stałego, więc pasożytnicze parametry rezystora nie mają znaczenia i można je pominąć [6].

2.2. Kondensator

Kondensator jest elementem elektronicznym, który gromadzi ładunek elektryczny. Wykonany jest z dwóch okładek, między którymi znajduje się dielektryk. Ładunek zgromadzony na okładkach kondensatora można opisać zależnością (2.2.1). Jednak ten wzór nie opisuje zależności pomiędzy prądem a napięciem kondensatora, która w lepszy sposób pokazuje działanie kondensatora w układach elektronicznych. Wzór (2.2.2) przedstawia zależność między prądem a napięciem kondensatora. Z przedstawionego wzoru wynika, że napięcie na kondensatorze nie może zmieniać się skokowo [4, 7].

$$Q = C \cdot U \quad (2.2.1)$$

gdzie:

- Q – ładunek elektryczny [C]
- C – pojemność kondensatora [F]
- U – napięcie między końcówkami kondensatora [V]

$$I = C \cdot dU/dt \quad (2.2.2)$$

gdzie:

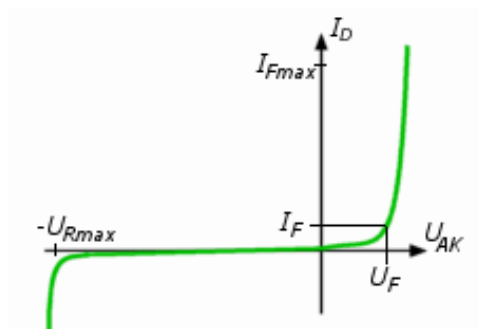
- I – natężenie prądu [A]
- C – pojemność kondensatora [F]
- dU/dt – pochodna napięcia na kondensatorze po czasie

W zależności od materiału, z którego zostały wykonane, wyróżnia się kondensatory [5]:

- ceramiczne,
- elektrolityczne,
- foliowe,
- papierowe,
- mikowe.

2.3. Dioda

Diody są przyrządami półprzewodnikowymi o dwóch końcówkach – anodzie i katodzie. Charakterystyka na rysunku 2.3.1 przedstawia typową charakterystykę prądowo – napięciową diody. Główną cechą diody jest przewodzenie w jednym kierunku. Dzieje się tak w przypadku przyłożenia do anody dodatniego napięcia względem katody. Napięcie to jest określane napięciem przewodzenia diody - U_F . Może dojść również do przewodzenia w drugim kierunku – zaporowym, aby do tego doszło potrzebne jest osiągnięcie napięcia U_R , które jest znacznie większe od napięcia U_F [7, 8, 9, 10].



Rys. 2.3.1. Charakterystyka prądowo – napięciowa diody [11]

Zasada działania diody wynika z jej budowy. Obszarem aktywnym diody jest prostujące złącze półprzewodnikowe. Po spolaryzowaniu diody w kierunku zaporowym zostaje zwiększona bariera potencjału, co jest wynikiem opróżnienia obszaru złącza p–n z elektronów i dziur. Natomiast w przypadku odwrotnej polaryzacji diody następuje zmniejszenie bariery potencjału. Z obszaru p do obszaru n napływa ładunek dodatni – dziur, natomiast z obszaru n do p napływa ładunek ujemny – elektrony, czyli następuje przepływ prądu przez złącze p–n [9, 10, 12].

Istnieje wiele typów diod, które różnią się od siebie niektórymi parametrami. Wynika to z tego, że przeznaczone są do wykonywania innych zadań. Wyróżnia się diody [8]:

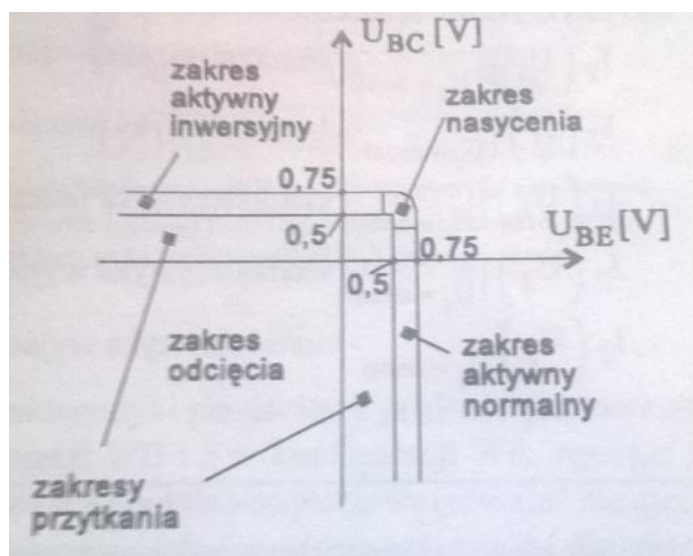
- prostownicze,
- Zenera,
- pojemnościowe,
- przełączające,
- fotodiody
- elektroluminescencyjne.

2.4. Tranzystory bipolarne NPN i PNP

Tranzystor bipolarny posiada półprzewodnikowy obszar roboczy o strukturze n-p-n lub p-n-p. Tranzystor może być traktowany jako szeregowe połączenie diod, które są sprzężone ze sobą, ze względu na bliskość występowania złącza p-n oraz n-p. Środkowy obszar, nazywany bazą, ma inny typ przewodnictwa niż pozostałe obszary tranzystora – emiter i kolektor. Różnice występujące między tranzystorem NPN a PNP, polegają jedynie na odmiennych polaryzacjach prądów i napięć [8, 12].

Tranzystor bipolarny może pracować w czterech zakresach pracy. Na rys. 2.4.1 [8] przedstawiono wszystkie zakresy pracy dla tranzystora NPN. Zakres odcięcia oraz aktywny normalny są najczęściej wykorzystywane, dlatego też podczas testowania tranzystorów bipolarnych skupiono się głównie na nich. W zakresie odcięcia złącze baza – emiter spolaryzowane jest zaporowo i uniemożliwia przepływ ładunków, dlatego przez tranzystor nie

płyne prąd. W przypadku zakresu aktywnego normalnego, złącze baza – emiter jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia, co powoduje, że przez tranzystor przepływa prąd [8, 9, 13].



Rys. 2.4.1. Zakresy pracy tranzystora bipolarnego NPN [8]

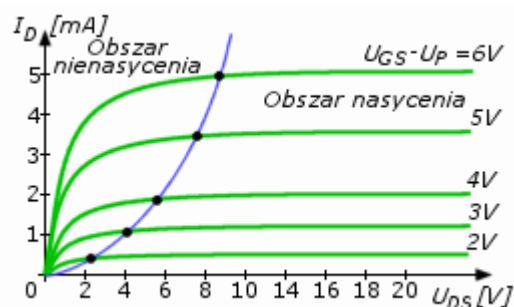
Zastosowanie tranzystorów bipolarnych jest dosyć szerokie. Są stosowane zarówno w układach analogowych jak i w układach cyfrowych. Przykładem wykorzystania tranzystora w układzie analogowym jest wzmacniacz. Wzmocnienie takiego wzmacniacza zależy od użytej konfiguracji oraz zakresu pracy. Natomiast w układach cyfrowych tranzystory bipolarne wykorzystywane są jako przełączniki i służą do realizacji logiki układu [8, 14].

2.5. Tranzystory MOSFET z kanałem wzbogaconym typu n i typu p

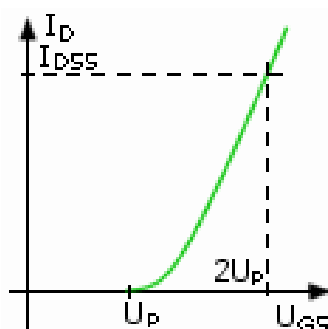
Tranzystory MOSFET są to tranzystory polowe z izolowaną bramką. Rolę izolacji pełni warstwa dielektryka, którym najczęściej jest tlenek krzemu. Działanie tranzystorów polowych polega na sterowaniu przepływem prądu w kanale, który znajduje się pomiędzy źródłem a drenem. Sterowanie może się odbywać poprzez podanie odpowiedniego napięcia na bramkę, lub poprzez podanie napięcie pomiędzy dren a źródło [8, 9, 12].

Tranzystor MOSFET pracuje w trzech zakresach, które zostaną opisane na podstawie tranzystora typu n. Wyróżnia się zakres zatkania, nienasycenia i nasycenia. Zakres zatkania występuje, gdy $U_{GS} < U_P$, gdzie U_{GS} – napięcie bramka – źródło [V], U_P – napięcie progowe [V]. Tranzystor zachowuje się jak dwie diody połączone szeregowo przeciwnie. U_P określa jakie napięcie należy podać pomiędzy bramkę a źródło, aby odblokować tranzystor. Kolejnym zakresem jest zakres nienasycenia, dla którego muszą być spełnione zależności $U_{GS} \geq U_P$ oraz $0 \leq U_{DS} < U_{GS} - U_P$, gdzie U_{DS} – napięcie dren – źródło. W tym zakresie indukuje się kanał i prąd drenu I_D zależy od napięcia U_{DS} , tak jak to pokazano na rys. 2.5.1. Ostatnim zakresem jest zakres nasycenia, różni się od zakresu nienasycenia tym, że $U_{DS} \geq U_{GS} - U_P$. Następuje

nasycenie prądu drenu, zwiększanie napięcia U_{DS} nie powoduje zwiększenia prądu. Zależności I_D od U_{GS} przedstawiono na rys. 2.5.2 [9, 15].



Rys. 2.5.1. Charakterystyka $I_D(U_{DS})$ dla tranzystora MOSFET typu n [16]



Rys. 2.5.2. Charakterystyka $I_D(U_{GS})$ dla tranzystora MOSFET typu n [16]

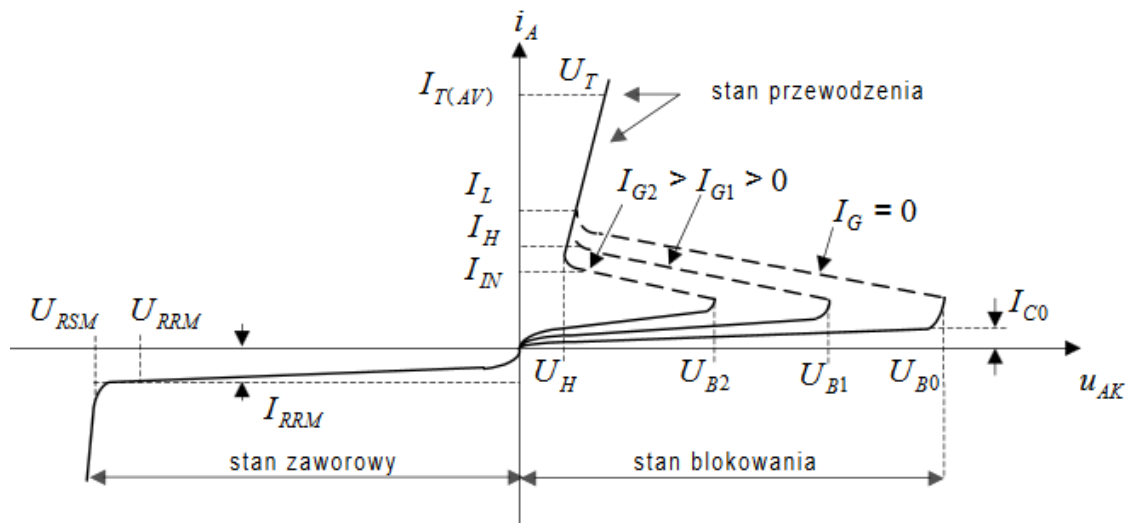
Tranzystory MOSFET podobnie jak tranzystory bipolarne posiadają właściwości wzmacniające i przełączające. Bardzo często są stosowane do realizacji kluczy np. przełączników analogowych [17]. Dodatkowo wykorzystuje się je do realizacji scalonych układów cyfrowych, które charakteryzują się mniejszym poborem prądu niż układy bazujące na tranzystorach bipolarnych [14].

2.6. Tyrystor

Tyrystor pełni rolę sterowanej diody. W odróżnieniu od diody nie posiada dwóch warstw półprzewodnika a cztery. Pomiedzy anodą – warstwą typu p, i katodą – warstwą n, znajdują się dwie warstwy pośrednie. Warstwa typu p przylegająca do katody pełni rolę bramki. Jej odpowiednia polaryzacja umożliwia przepływ prądu pomiędzy anodą a katodą. Podanie dodatniego napięcia na bramkę powoduje włączenie tyrystora. Przy braku dodatniego napięcia na bramce, jeśli tyrystor został wcześniej włączony, to prąd dalej przepływa przez główny obwód tyrystora. Wyłączenie tyrystora następuje dopiero po zaniku dodatniego napięcia anodowego [8, 9].

Pracę tyrystora można podzielić na kilka zakresów, tak jak pokazano na rys. 2.6.1. Pierwszym jest zakres zaporowy, w którym tyrystor jest wyłączony, ale przepuszcza niewielki prąd wsteczny. Następny jest zakres blokowania, anoda i katoda są prawidłowo spolaryzowane,

natomiast nie zostało osiągnięte odpowiednie napięcie na bramce. Trzecim zakresem jest stan przewodzenia – włączenia [18].



Rys. 2.6.1. Charakterystyka napięciowo – prądowa tyrystora [18]

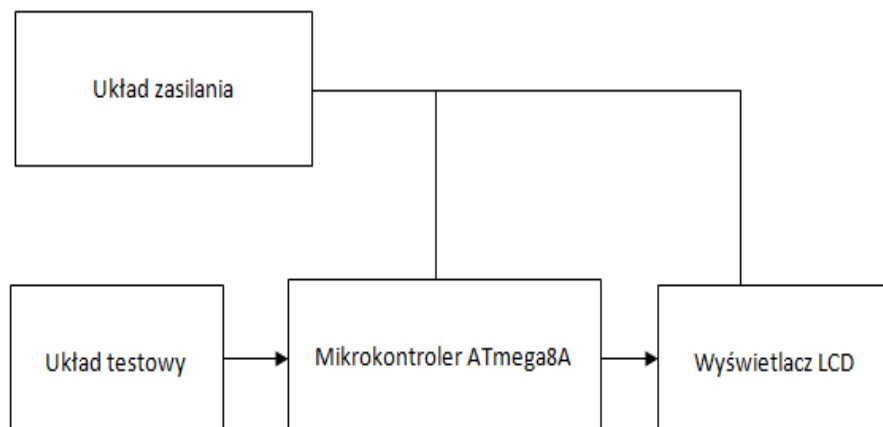
Tyrystor posiada tylko dwa stany – przewodzenia i nieprzewodzenia. Jednak pomimo prostego sposobu działania znalazł zastosowanie w wielu układach jako [19]:

- sterownik prądu stałego,
- sterownik prądu przemiennego,
- przemiennik częstotliwości.

3. SYSTEM POMIAROWY

Projektując układ warto jest go podzielić na mniejsze bloki, które będą odpowiadały za konkretne funkcje urządzenia. Bloki powinny ze sobą współpracować, aby zapewnić poprawną pracę układu. Podział na bloki pozwala lepiej zorganizować projekt zarówno podczas tworzenia schematu ideowego, płytki drukowanej, jak i podczas uruchamiania urządzenia.

Realizowany system pomiarowy został podzielony na bloki funkcjonalne, tak jak pokazano na rys. 3.1. System składa się z bloku zasilania, który dostarcza zasilanie o odpowiednim poziomie napięcia, potrzebnym do prawidłowej pracy pozostałych urządzeń układu. Kolejnym blokiem jest układ testowy, który składa się z podstawki pod elementy i grupy rezystorów. Jego zastosowanie ma na celu rozszerzenie możliwości pomiarowych mikrokontrolera. Sam mikrokontroler odpowiada za wykonywanie pomiarów, obliczenia i sterowanie wyświetlaczem LCD. Natomiast wyświetlacz LCD wykorzystywany jest do wyświetlenia wyników testów.

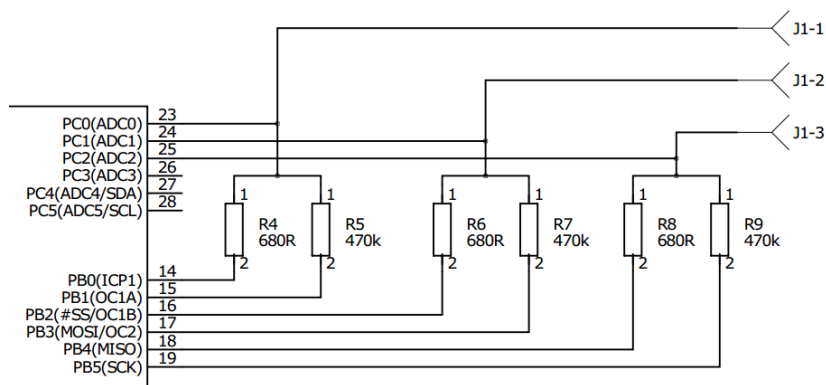


Rys. 3.1. Schemat blokowy testera

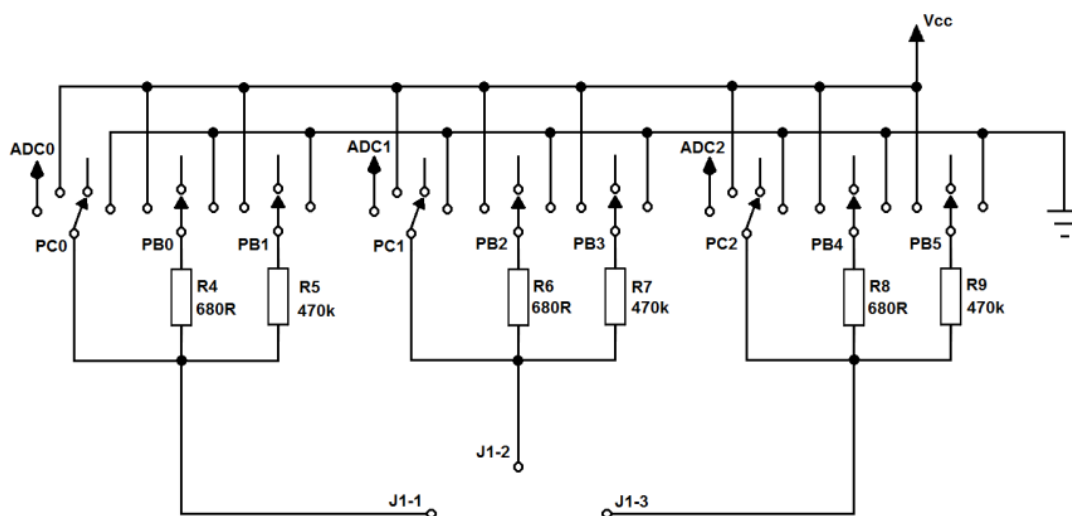
W dalszej części pracy zostaną przedstawione poszczególne bloki schematu blokowego testera.

3.1. Układ testowy

Jest to prosty układ zbudowany z rezystorów i pinów testowych, odpowiednio podłączonych do mikrokontrolera. Sposób podłączenia układu testowego został przedstawiony na rys. 3.1.1, natomiast na rys. 3.1.2 przedstawiono zasadę jego działania. Dla każdego pinu testowego przypada po dwa rezystory: jeden $680\ \Omega$ i drugi $470\ \text{k}\Omega$. Zastosowane rezystory mają tolerancje 1%, aby wyniki były obarczone jak najmniejszym błędem.



Rys. 3.1.1. Układ testowy



Rys. 3.1.2. Zasada działania układu testowego

Podstawka pod elementy J1 służy do umieszczenia badanego elementu. Pozwala na swobodne wkładanie i wyjmowanie elementów. Wyprowadzenia podstawki są połączone poprzez rezystory z wyprowadzeniami sterującymi mikrokontrolera *PB0 – PB5*, oraz z wejściami przetwornika *A/C PC0 – PC2*. Działanie pinów mikrokontrolera można porównać do działania kluczy. W przypadku pinów *PB0 – PB5*, ścieżki mogą być zwierane do zasilania lub masy, poprzez wystawienie odpowiednio stanu wysokiego lub stanu niskiego, oraz rozwierane, poprzez ustawienie pinu jako wejście o wysokiej impedancji. Dodatkowo piny *PC0 – PC2* mogą być ustawione jako wejście przetwornika *A/C* w celu dokonania pomiarów. Idea przeprowadzania pomiarów polega na odpowiednim ustawieniu kluczy, w celu pobudzenia testowanego elementu i pomiaru napięcia na jego pinach. Na podstawie wykonanych pomiarów możliwe jest rozpoznanie elementu.

Zadaniem rezystorów jest ograniczenie prądu płynącego z wyprowadzeń sterujących mikrokontrolera. Bez zastosowania rezystorów prąd płynący przez testowany element mógłby być na tyle duży, że uszkodziłby testowany element, jak również porty mikrokontrolera.

Zastosowanie dwóch różnych wartości rezystancji daje większe możliwości testowania, ponieważ programista może dobrać odpowiedni rezystor do badanego elementu. Dodatkową opcją jest pobudzenie testowanego elementu bezpośrednio z wyprowadzenia mikrokontrolera, bez stosowania rezystora, ale uniemożliwia to wykorzystanie danego kanału przetwornika A/C.

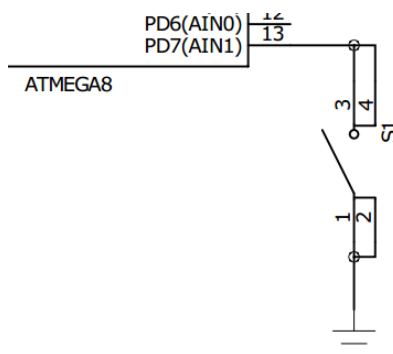
3.2. Mikrokontroler

W przedstawionym urządzeniu zastosowano mikrokontroler ATmega8A. Jest to jeden z najpopularniejszych mikrokontrolerów 8-bitowych. Posiada 8 kB pamięci programu - Flash i 1 kB pamięci podręcznej – SRAM. Rozmiar posiadanej pamięci nie jest duży, ale wystarczający do prostych układów takich jak tester elementów półprzewodnikowych. Układ posiada 23 linie I/O – wejścia/wyjścia, które mogą zostać dowolnie zaprogramowane w celu komunikacji mikrokontrolera z zewnętrznymi układami. Jednym z istotniejszych układów peryferyjnych mikrokontrolera jest przetwornik A/C o rozdzielczości 10 bitów [20].

Zegar w mikrokontrolerze został ustawiony na 8 MHz. Skorzystano z wewnętrznego oscylatora RC. Jedynym pomiarem, w którym ważną rolę pełni pomiar czasu jest pomiar pojemności, ale nie jest on na tyle istotny, aby zastosować zewnętrzny sygnał zegarowy o większej dokładności. Z tego względu wyniki pomiaru pojemności mogą się nieznacznie różnić od rzeczywistych wielkości, ale należy pamiętać, że głównym zadaniem projektowanego układu jest rozpoznawanie elementów. Dodatkowo użycie zewnętrznego źródła sygnału zegarowego zwiększyłoby liczbę elementów potrzebnych do poprawnej pracy układu.

ATmega8A posiada 23 programowalne linie I/O, które można ustawić jako wejścia. Wykorzystywane są wtedy do odbierania sygnałów z zewnątrz, lub jako wyjścia, aby sterować zewnętrznymi układami. Porty od PD0 do PD5 ustawiono jako wyjścia i zostały wykorzystane do sterowania wyświetlaczem LCD.

Port PD7 został wykorzystany jako wejście, w celu odczytu stanu przycisku, który uruchamia procedurę testową. Sposób podłączenia przycisku zaprezentowano na rys. 3.2.1. Ustawiając linie I/O istnieje możliwość ustawienia opcji *pull-up*, czyli podciągnięcia pinu do zasilania przez wewnętrzny rezystor, którego rezystancja wynosi 20 – 50 kΩ. Podciągnięcie pinu do zasilania spowoduje, że pin wejściowy mikrokontrolera będzie przyjmował tylko dwa stany logiczne, stan wysoki i stan niski. Zastosowanie wewnętrznego rezystora podciągającego wyeliminowało potrzebę użycia zewnętrznego rezystora, zmniejszając liczbę potrzebnych elementów. Często stosując przyciski używa się podłączonego równolegle kondensatora, w celu sprzętowej eliminacji drgań styków. Jednak w tym przypadku zdecydowano się wyeliminować drgania styków metodą programową. Przycisk służy do uruchomienia procedury testowej, która jest głównym zadaniem mikroprocesora. Poza procesem testowania moc obliczeniowa mikroprocesora nie jest wykorzystywana, więc programowa metoda eliminacji drgań styków nie wpłynie negatywnie na wykonywany program.



Rys. 3.2.1. Podłączenie przycisku do mikrokontrolera

Kolejne wykorzystane linie *I/O* to *PB0* – *PB5*, opis ich wykorzystania został przedstawiony w podrozdziale **Układ testowy**. Jeśli w danej chwili nie jest przeprowadzany pomiar, to piny *PB0* – *PB5* są ustawiane jako wejścia i podciągane do zasilania przez wewnętrzne rezystory, w celu ograniczenia poboru mocy.

Niezbędnym układem do realizacji tego projektu jest przetwornik *A/C*, który został wbudowany w mikrokontroler. Jest to przetwornik o rozdzielczości 10-bitowej. Posiada 6 kanałów, z czego zostały wykorzystane 4. Mikrokontroler posiada wewnętrzne źródło napięcia referencyjnego, którego wartość wynosi 2,56 V, wykorzystanie go wiązałoby się z koniecznością użycia dzielnika napięciowego do pomiaru napięcia na pinach testowych urządzenia. Z tego powodu jako źródło napięcia referencyjnego wybrano pin *AVcc*, na którym napięcie wynosi 5 V, a pin *AVref* został podłączony do masy przez kondensator 100 nF, według zaleceń producenta.

Sygnał zegarowy taktujący przetwornik *A/C* jest to odpowiednio podzielony główny sygnał zegarowy mikrokontrolera. Ustalanie częstotliwości zegara przetwornika polega na wybraniu jednej z siedmiu dostępnych wartości preskalera. W przedstawionym projekcie wybrano preskaler o wartości 64. Częstotliwość sygnału taktującego można obliczyć ze wzoru (3.2.1). Przy sygnale zegarowym mikrokontrolera równym 8 MHz, częstotliwość sygnału zegarowego przetwornika *A/C* wynosi 125 kHz. Jest to najwyższa możliwa częstotliwość, przy danym sygnale zegarowym mikrokontrolera, która pozwala na zachowanie 10-bitowej rozdzielczości pomiaru, ponieważ producent podaje, że częstotliwość ta powinna być wyższa niż 50 kHz i niższa niż 200 kHz.

$$f_{ADC} = f_{CLK} / P \quad (3.2.1)$$

gdzie:

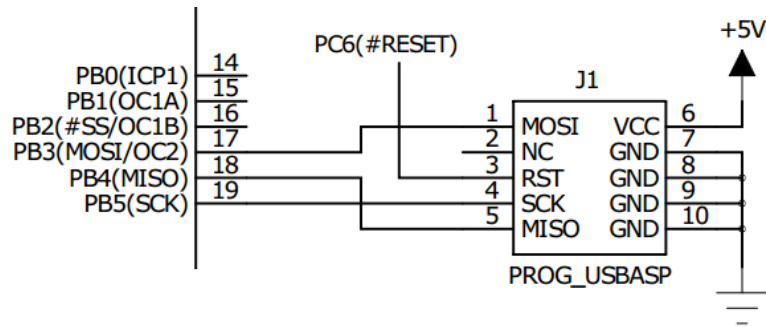
f_{ADC} – częstotliwość sygnału zegarowego przetwornika A/C

f_{CLK} – częstotliwość sygnału zegarowego mikrokontrolera

P – wybrany preskaler

Przetwornik A/C jest wykorzystywany do pomiaru napięć na nóżkach badanych elementów. Ze względu na to, że przetwornik posiada tylko jeden układ przetwornika nie jest możliwy pomiar wszystkich pinów testowych w danej chwili. Z tego powodu podczas pomiaru należy przełączać kanał pomiarowy. Do wykrycia elementów półprzewodnikowych i rezystora nie jest konieczne zbadanie charakterystyk dynamicznych, wystarczy zbadanie charakterystyki statycznej, dlatego w pierwszym etapie wykonywanych jest kilka pomiarów każdego z kanałów testowych. Następnie pomiary dla danego kanału są uśredniane, ma to na celu zwiększenie dokładności pomiarów, wyeliminowanie szumów. Wadą tego rozwiązania jest czas potrzebny na wykonanie wszystkich pomiarów. Inaczej wygląda natomiast pomiar pojemności. Trzeba wykryć ładowanie lub rozładowywanie kondensatora, to z kolei wiąże się częstymi pomiarami. W tym przypadku uśrednianie wyników nie jest stosowane.

We współczesnych mikrokontrolerach powszechnie stosowane jest rozwiązanie konstrukcyjne In-System Programming. Polega na tym, że producent układu w jego pamięci umieszcza program zwany Boot Loaderem, który umożliwia wprowadzenie mikrokontrolera w stan programowania, a następnie poprzez wyprowadzenia układu następuje programowanie pamięci. Stosowanie takich rozwiązań pozwala na szybkie wgrywanie, zmienianie oprogramowania. Z tego powodu zastosowano dodatkowe złącze do mikrokontrolera, które służy do podłączenia programatora. Sposób podłączenia złącza zilustrowano na rys. 3.2.2. Wykorzystywanym programatorem był USBasp. Musi on zostać podłączony do następujących pinów mikrokontrolera: *MOSI*, *MISO*, *SCK*, *#RESET* oraz *GND*. Połączenie pinu *Vcc* mikrokontrolera i pinu *Vcc* programatora jest opcjonalne. Jest to dość popularne urządzenie stosowane w amatorskich warsztatach elektronicznych. Zastosowanie złącza ułatwiło testowanie urządzenia, ponieważ wyjmowanie mikrokontrolera z podstawki w celu zaprogramowania stałoby się nużące. Dodatkowo mikrokontroler znajduje się pod wyświetlaczem LCD, więc wyjęcie układu musiałoby zostać poprzedzone wyjęciem wyświetlacza.



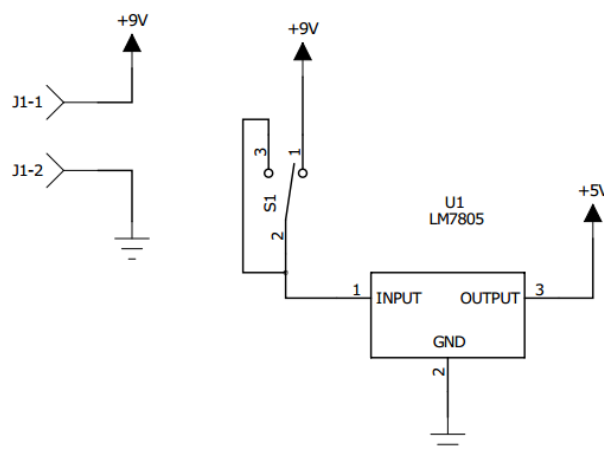
Rys. 3.2.2. Podłączenie programatora USBasp do mikrokontrolera

Ostateczny rozmiar programu wyniósł 6,54 kB, czyli 81% pamięci programu mikrokontrolera. Dalszy rozwój programu może wymagać zwiększenia pamięci, co wiąże się z wymianą mikrokontrolera np. na Atmega168, która posiada 16 kB pamięci programu. Przeniesienie programu na podany mikrokontroler nie będzie stwarzało większego problemu, ponieważ oba mikrokontrolery posiadają identycznie rozmieszczone wyprowadzenia.

3.3. Układ zasilania

Budowę układu zasilania przedstawiono na rys. 3.3.1. Składa się ze złącza J1 przeznaczonego na baterię 9 V, włącznika zasilania S1 oraz stabilizatora LM7805 – U1.

Zdecydowano się na zasilanie testera elementów półprzewodnikowych z przenośnego źródła zasilania. Takie rozwiązanie pozwala na korzystanie z urządzenia w dowolnym miejscu, nie ma potrzeby podłączać do urządzenia zasilacza, co wiąże się z potrzebą wykorzystania gniazdka sieciowego. Dodatkowo zaletą jest brak kabli, które powodują powstawanie bałaganu na stanowisku pracy. Jako przenośne źródło zasilania wykorzystano baterię 9 V, ze względu na mały rozmiar. W porównaniu na przykład z bateriami AAA, które mają 1,5 V, bateria 9 V ma rozmiar dwóch baterii AAA, przy czym do poprawnej pracy mikrokontrolera należałoby zastosować minimum 3 baterie typu AAA. Dodatkowo łatwiej jest wymienić jedną baterię niż kilka.



Rys. 3.3.1. Układ zasilania

Zastosowane źródło zasilania ma napięcie 9 V, natomiast mikrokontroler może być zasilany maksymalnie napięciem 6 V, wyświetlacz LCD powinien być zasilany napięciem 5 V. Z tego powodu należało dodać układ, który dopasuje napięcie do możliwości zastosowanych układów. Do tego celu użyto układu LM7805. Jest to stabilizator napięcia o napięciu wyjściowym równym 5 V. Producent podaje, że napięcie wyjściowe stabilizatora powinno być wyższe od napięcia wyjściowego o 2 V, czyli założenie to zostało spełnione.

Opcjonalnym źródłem zasilania w wersji testowej urządzenia może być programator USBasp. Wynika to z faktu, że programator posiada wyprowadzone linie zasilania, *Vcc* i *GND*, o napięciu 5 V, połączone z układem tak, jak pokazano na rys. 3.2.2. Dodatkowo programator został wyposażony w zworkę, która pozwala na włączenie lub wyłączenie zasilania zewnętrznych układów. Programator jest zasilany poprzez port USB komputera, dla USB 2.0 maksymalny prąd wynosi 500 mA, więc jest to wystarczający prąd, aby zasilić układ testera. Stosowanie zasilania z programatora USBasp jest zalecane przy wyłączonym zasilaniu baterijnym i na odwrót, zasilanie bateryjne jest zalecane przy wyłączonym zasilaniu z programatora.

Przy każdym uruchomieniu testera wyświetlany jest komunikat o poziomie naładowania baterii. Pomiar napięcia baterii został zrealizowany za pomocą przetwornika *A/C* znajdującego się w mikrokontrolerze. Maksymalne mierzone napięcie przez przetwornik wynosi 5 V, więc bezpośredni pomiar napięcia na baterii jest niemożliwy. Do tego celu wykorzystano dzielnik prądowy złożony z rezystorów 10 k Ω i 3,3 k Ω . Dzielnik zastosowano za przełącznikiem zasilania, ponieważ zastosowanie go przed przełącznikiem powodowałoby straty energii nawet przy wyłączonym urządzeniu.

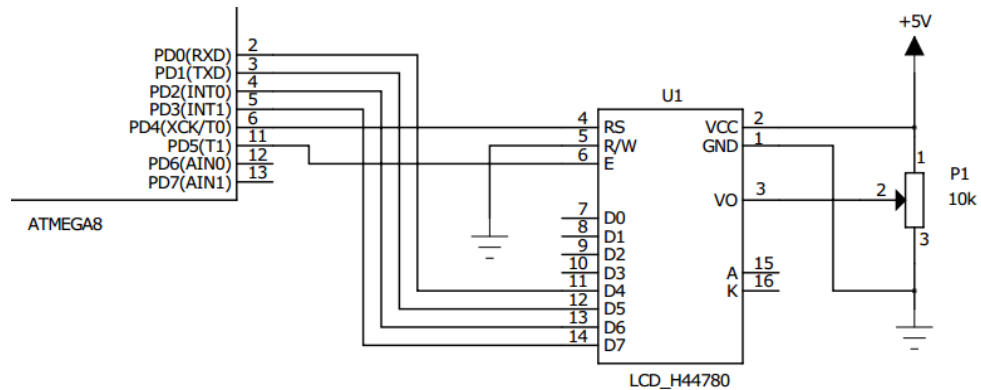
3.4. Wyświetlacz

Tester elementów półprzewodnikowych powinien posiadać interfejs użytkownika, który posłuży do poinformowania użytkownika o wyniku pomiarów. Najprostszym rozwiązaniem byłyby diody LED. Jednak nie zdecydowano się na tego typu interfejs ze względu na ograniczone możliwości rozbudowy urządzenia, a także z powodu małej ilości informacji, które mogą w ten sposób zostać przekazane użytkownikowi. O wiele lepszym rozwiązaniem wydaje się być wyświetlacz LCD, który znacznie rozszerza możliwości przekazywania informacji o wykonanych testach.

W przedstawionym w tej pracy testerze użyto wyświetlacza LCD, wyświetlającego w dwóch wierszach po 16 znaków. Układ wyświetlacza jest wyposażony w sterownik HD44780, który ułatwia komunikację pomiędzy mikrokontrolerem a wyświetlaczem. Dodatkowo dużą zaletą tego wyświetlacza jest to, że można do niego znaleźć wiele darmowych bibliotek.

Sposób podłączenia został przedstawiony na rys. 3.4.1. Linie sterujące *E* oraz *RS* zostały podłączone do mikrokontrolera, natomiast linia *R/W* została podłączona do masy, co powoduje, że sterownik wyświetlacza może tylko dobierać dane. Dzięki temu oszczędzono

jedno wyprowadzenie mikrokontrolera, i kolejne cztery poprzez użycie tylko czterech linii danych ($D4 - D7$), zamiast ośmiu. Wadą takiego podłączenia jest spowolnienie operacji zapisu danych do wyświetlacza, co w tym przypadku nie ma dużego znaczenia, a zaoszczędzone porty mikrokontrolera można przeznaczyć na rozbudowę całego układu.



Rys. 3.4.1. Podłączenie wyświetlacza

Do wyświetlacza dodano potencjometr montażowy $10\text{ k}\Omega$, w celu regulacji kontrastu wyświetlacza. Gdy urządzenie zostało złożone i uruchomione, okazało się, że zapomniano o podłączeniu pinów odpowiedzialnych za podświetlenie. W następnej wersji urządzenia powinny zostać dodane połączenia, katody do masy i anody do zasilania przez rezystor około $100\ \Omega$. Bez podświetlenia wyświetlacz też działa, ale wyświetlane informacje są gorzej widoczne.

4. OPIS TESTOWANIA ELEMENTÓW

Zadaniem projektowanego testera elementów półprzewodnikowych jest identyfikacja elementu. Do tego celu należało napisać oprogramowanie, które wykorzysta zasoby sprzętowe do realizacji zadania. Realizując oprogramowanie korzystano z charakterystycznych właściwości badanych elementów. Każdy element posiada własny układ testowy, w którym muszą zostać spełnione pewne warunki, aby element został uznany za zidentyfikowany.

Podczas tworzenia funkcji rozpoznających elementy zauważono, że niewielka modyfikacja kodu pozwoli wprowadzenie dodatkowej funkcjonalności urządzenia. Do funkcji urządzenia dodano:

- rozpoznawanie wyprowadzeń testowanego elementu,
- pomiar rezystancji,
- pomiar pojemności,
- pomiar napięcia przewodzenia diody.

4.1. Badanie rezystancji

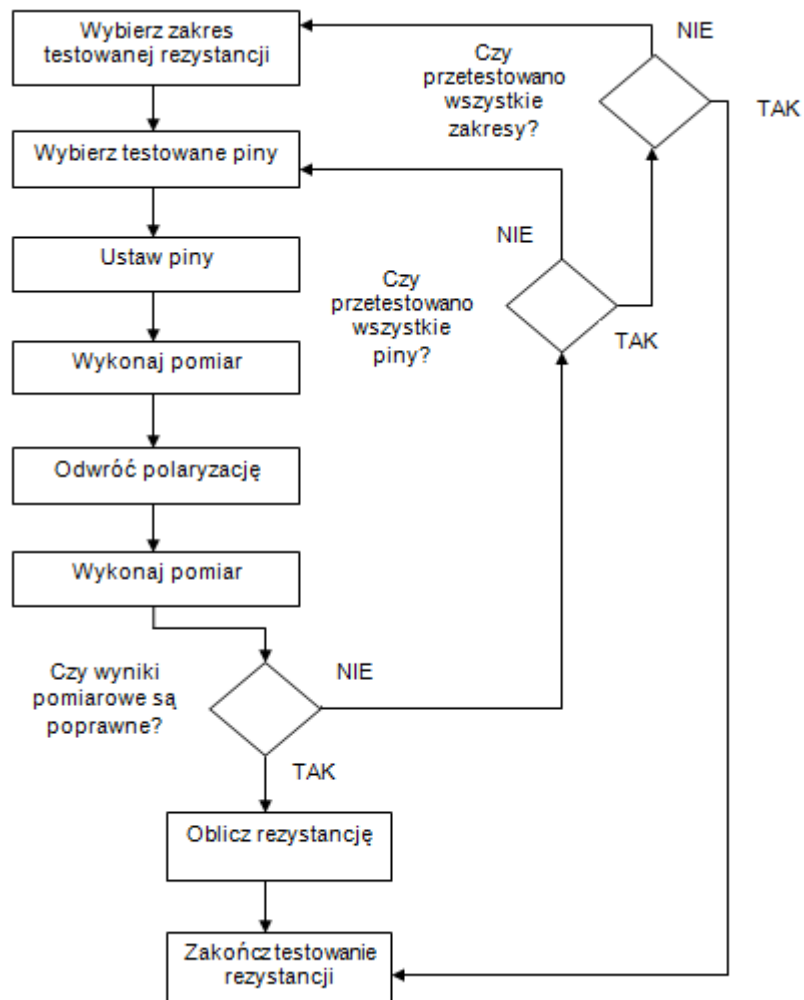
Testowanie rezystancji polega na sprawdzeniu, czy spadek napięcia na elemencie jest taki sam, niezależnie od polaryzacji źródła napięcia testowego. Cały algorytm zaprezentowano na rys. 4.1.1. Pomiar rezystancji odbywa się w układzie dzielnika napięciowego.

Na początku pomiaru wybierany jest zakres testowanej rezystancji. Zakresy wynikają z tego, jakich rezystorów użyto w układzie testowym. Zaprogramowano dwa zakresy pomiaru rezystancji, jeden wykorzystuje dwa rezystory $680\ \Omega$, drugi zaś wykorzystuje jeden rezystor $680\ \Omega$ oraz jeden $470\ \text{k}\Omega$. Zależność (4.1.1) pozwala wyliczyć teoretyczne zakresy. Podczas wyliczania zakresów przyjęto $E = 5\ \text{V}$, ponieważ tyle wynosi napięcie dla stanu wysokiego na pinie mikrokontrolera. Natomiast zakres możliwych napięć na rezystorze testowym przyjęto od $0,1\ \text{V}$ do $4,9\ \text{V}$, jest to spowodowane tym, że w przypadku napięcia poniżej $0,1\ \text{V}$ trudno stwierdzić, czy mamy do czynienia z małą rezystancją, czy z błędem pomiarowym. Za górną granicę przyjęto $4,9\ \text{V}$, ponieważ napięcie w okolicach $5\ \text{V}$ może świadczyć o braku podłączonego elementu – rozwarciu lub dużej rezystancji elementu. Wyliczone zakresy pomiarowe z uwzględnieniem wymaganego minimalnego i maksymalnego napięcia na elemencie testowym są następujące:

- od $28\ \Omega$ do $66,5\ \text{k}\Omega$ przy wykorzystaniu dwóch rezystorów $680\ \Omega$,
- od $10\ \text{k}\Omega$ do $23\ \text{M}\Omega$ przy wykorzystaniu rezystorów $680\ \Omega$ i $470\ \text{k}\Omega$.

Daje to teoretycznie szeroki zakres testowanych rezystancji. Jednakże podczas pomiarów drugiego zakresu zaobserwowano, że dla rozwarcia zmierzona wartość napięcia między pinami testowymi wynosi w okolicach $4,3\ \text{V}$. Z tego powodu postanowiono zmniejszyć drugi zakres

pomiarowy, aby rozwarcie nie zostało wykryte jako duża rezystancji. Przy drugiej konfiguracji zmniejszono maksymalne możliwe napięcie na rezystorze do 4,2 V, co spowodowało zmniejszenie drugiego zakresu do 2,4 MΩ. Nadal zakres testowanej rezystancji jest szeroki i obejmuje najczęściej stosowane wartości rezystancji.



Rys. 4.1.1. Algorytm testowania rezystancji

$$R_X = U_X \cdot (R_1 + R_2) / (E - U_X) \quad (4.1.1)$$

gdzie:

R_X – mierzona rezystancja [Ω]

U_X – napięcie na mierzonej rezystancji [V]

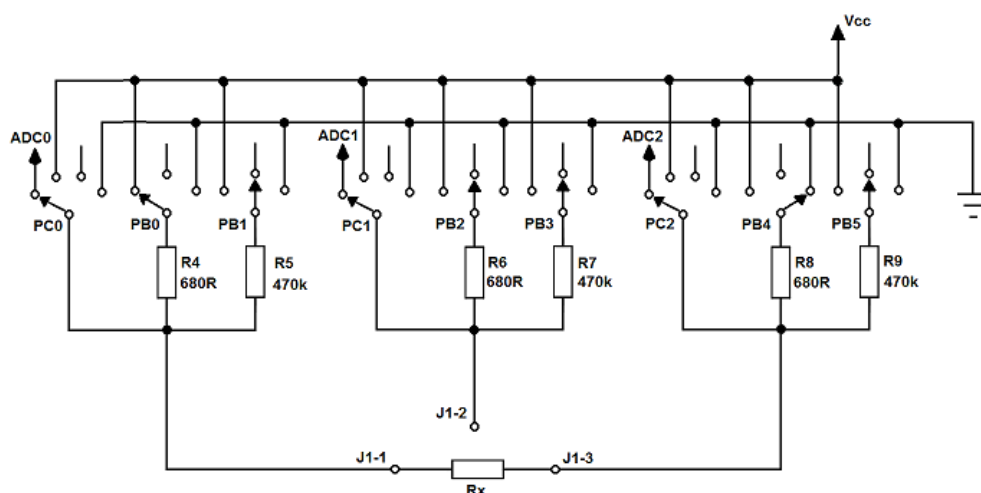
R_1, R_2 – rezystory układu testowego [Ω]

E – napięcie źródła [V]

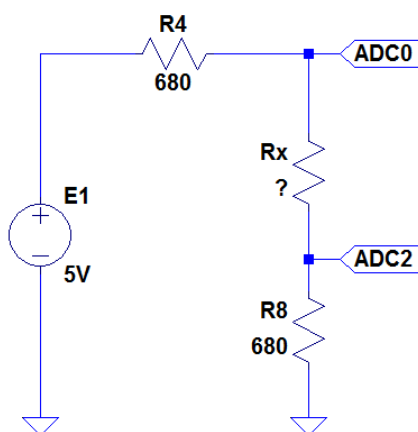
Gdy zostanie wybrany zakres testowanej rezystancji, program wybiera jedno z trzech możliwych podłączeń rezystora do pinów testowych. Rezystor może zostać podłączony do

pinów J1-1 i J1-2, J1-1 i J1-3 lub J1-2 i J1-3. Wybrana aktualnie konfiguracja jest zapisywana, aby w przypadku wykrycia elementu poinformować użytkownika, na których pinach testowych wykryto rezystor.

Następnym krokiem jest ustawienie pinów mikrokontrolera. Porty *PC0* – *PC2* ustawiane są jako wejścia przetwornika A/C. Ustawienie portów *PB0* – *PB5* zależy od wybranego zakresu testowanej rezystancji, który decyduje o użytych rezystorach oraz wybranej konfiguracji podłączenia rezystora. Konfiguracja określa, który port zostanie ustawiony w stan wysoki, a który w stan niski. Pozostałe niewykorzystane porty ustawiane są jako wejścia o wysokiej impedancji, aby nie pobierały prądu, powodując niepoprawność pomiarów. Przykładowe ustawienie portów dla zakresu mniejszych rezystancji (2 rezystory 680 Ω) i pinów testowych J1-1 i J1-3 przedstawiono na rys. 4.1.2. Schemat w takiej postaci dobrze obrazuje, jak działa wybieranie portów, ale jest mało czytelny, jeśli chodzi o zasadę pomiaru, dlatego uproszczony schemat z rys.4.1.2 przedstawiono na rys.4.1.3.



Rys. 4.1.2. Przykładowe ustawienie portów podczas testowania rezystancji



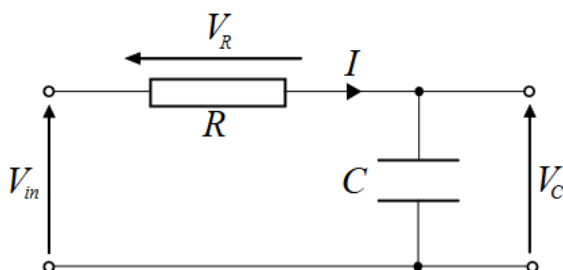
Rys. 4.1.3. Uproszczony schemat testowania rezystancji

Po ustawieniu portów wykonywane są pomiary napięcia na badanym elemencie. Wynik jest zapisywany, w celu późniejszego wykorzystania. Odwracana jest polaryzacja źródła napięciowego, czyli port, na który był podany stan wysoki, ustawiany jest w stan niski, a port, który wcześniej był ustawiony w stan niski przełączany jest w stan wysoki. Następnie wykonywany jest kolejny pomiar napięcia na badanym elemencie. Odwrócenie polaryzacji ma na celu wykorzystanie zasady działania rezystora, do odróżnienia go od innych elementów. Po wykonaniu dwóch pomiarów porównywane są uzyskane wyniki napięcia. Jeśli wyniki są podobne (przyjęto, że wyniki nie mogą się różnić o więcej niż 0,1 V), to element zostaje uznany za rezystor i dokonywane jest obliczenie rezystancji.

W przypadku, gdy uzyskane wyniki w obu pomiarach różnią się znacznie od siebie, zmieniane są testowane piny. Jeśli zmiana testowanych pinów nic nie dała, trzeba zmienić zakres mierzonej rezystancji. Po sprawdzeniu wszystkich możliwych kombinacji i braku pozytywnego wyniku, testowanie rezystancji kończy się.

4.2. Badanie pojemności

Testowanie pojemności jest przeprowadzane w układzie RC. Układ ten składa się z rezystora i kondensatora i został przedstawiony na rys. 4.2.1. Jest to układ I rzędu, którego odpowiedź skokową można zapisać wzorem (4.2.1). Stała czasowa układu określa czas, po jakim sygnał wyjściowy osiągnie 63% (tj. $1 - 1/e$) swojej wartości końcowej. Dla układu RC stałą czasową można obliczyć na podstawie zależności $\tau = R \cdot C$. Odpowiedź skokowa układu RC została przedstawiona w sposób graficzny na rys. 4.2.2 [7, 21, 22].



Rys. 4.2.1. Schemat układu RC [22]

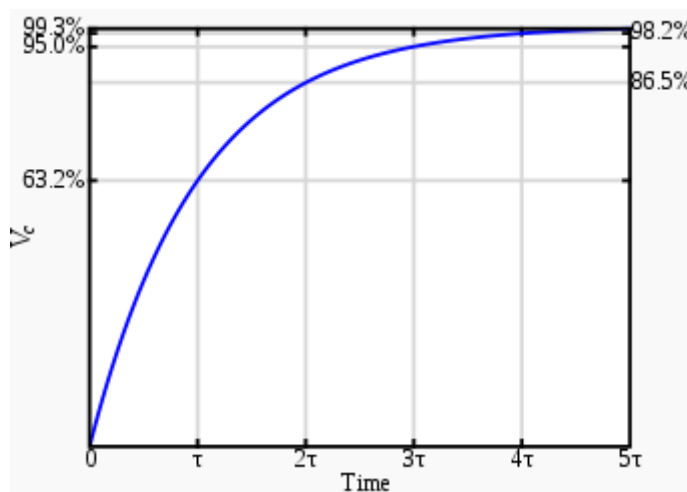
$$y(t) = K \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad (4.2.1)$$

gdzie:

$y(t)$ – odpowiedź skokowa układu w czasie t [V]

K – wzmacnienie układu [V]

τ – stała czasowa układu [s]



Rys. 4.2.2. Odpowiedź skokowa układu RC [22]

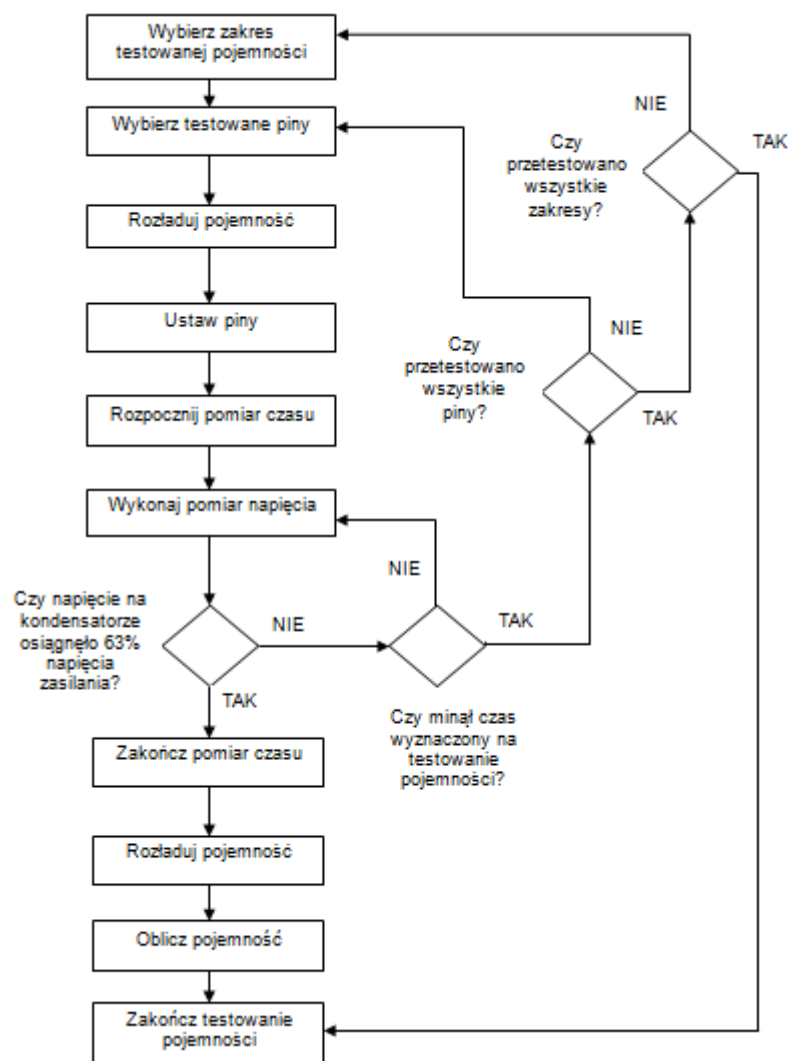
Sposób testowania pojemności przy wykorzystaniu układu RC polega na pobudzeniu układu testowego sygnałem skokowym i pomiarze napięcia na badanym elemencie – kondensatorze. Jeśli podłączony element rzeczywiście charakteryzuje się pojemnością, to uzyskany przebieg napięcia będzie miał postać jak na rys. 4.2.2 i będzie możliwe wykrycie momentu, gdy napięcie na elemencie osiągnie 63% wartości końcowej. Szczegółowy algorytm testowania pojemności przedstawiono na rys. 4.2.3.

Pierwszym etapem jest wybranie zakresu testowanej pojemności. Etap ten polega na wybraniu rezystora układu RC. Możliwe są dwa zakresy, jeden wykorzystuje rezystor 680 Ω, drugi 470 kΩ. Rezystancja opornika określa jak szybko będzie ładowana pojemność. Mniejsze pojemności szybciej się ładują, więc trzeba wydłużyć czas ładowania, stosując opornik o większej rezystancji, aby możliwe było wykrycie 63% napięcia końcowego na kondensatorze.

W drugim etapie wybierana jest jedna z trzech możliwych konfiguracji podłączenia kondensatora do pinów testowych. Jest to podobny etap jak przy testowaniu rezystancji. Program z góry przyjmuje jedną konfigurację i testuje ją, jeśli okaże się błędna, testuje kolejną, itd.

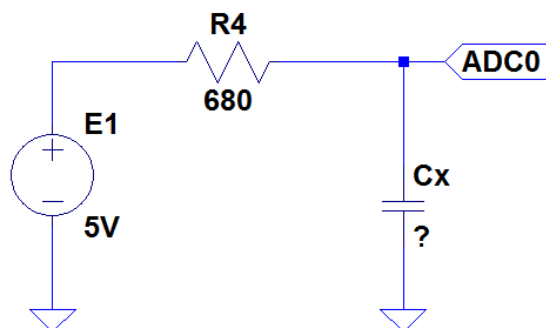
W celu zapewnienia poprawności testów, rozładowywana jest pojemność podłączonego elementu, która mogła zostać naładowana wskutek wcześniejszych pomiarów. Nie rozładowanie pojemności spowoduje, że pomiar nie będzie wykonywany z punktu początkowego, który na rys. 4.2.2 oznaczony jest jako $t = 0$ i w rezultacie zbadana odpowiedź będzie inna od oczekiwanej.

Następnie ustawiane są odpowiednie piny mikrokontrolera. W zależności od wybranego zakresu i testowanej konfiguracji odpowiedni pin mikrokontrolera ustawiany jest w stan wysoki, a inny pin bez podłączonego rezystora ustawiany jest w stan niski. Dzięki temu do pomiaru napięcia na kondensatorze wystarczy tylko jeden kanał przetwornika A/C, który jest dostosowywany do wybranej konfiguracji podłączenia elementu.



Rys. 4.2.3. Algorytm testowania pojemności

Użycie jednego kanału umożliwia częstsze próbkowanie kanału pomiarowego, dzięki czemu dokładność pomiarów jest większa, możliwe jest wykrycie mniejszych pojemności. Przykładowy uproszczony schemat pomiarowy pokazano na rys. 4.2.4.



Rys. 4.2.4. Przykładowy schemat testowania pojemności

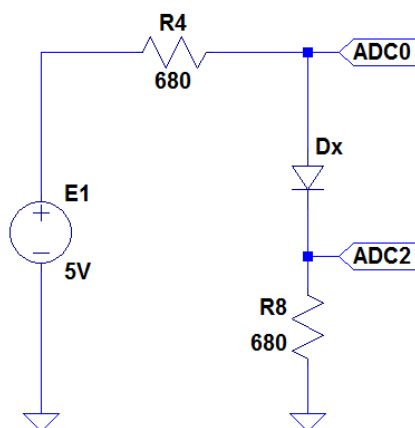
Gdy piny zostaną już odpowiednio ustawione, uruchamiany jest licznik sprzętowy. Licznik jest ustawiony na częstotliwość 31,25 kHz. Następnie uruchamiany jest przetwornik A/C. Jeśli zmierzone napięcie będzie odpowiadało wartości 63% napięcia końcowego, to wartość licznika zostanie zapamiętana w celu późniejszego obliczenia pojemności. W przypadku kiedy napięcie na elemencie nie osiągnie pożądanej wartości i nastąpi przepełnienie licznika, pomiar dla danej konfiguracji podłączenia elementu jest przerywany i uznawany za nieudany. Następuje sprawdzenie, czy istnieją jeszcze jakieś nieprzebadane konfiguracje, zakresy pomiarowe.

Pojemność zbadanego kondensatora jest obliczana na podstawie przedstawionej wcześniej zależności na stałą czasową układu RC. Jest to możliwe przy znanej wartości R i τ . Wartość $\tau = I/f_i$, gdzie I – wartość licznika, f_i – częstotliwość licznika.

Ze względu na występowanie pojemności pasożytniczych w innych elementach elektronicznych np. tranzystorach MOSFET; testowanie pojemności jest przeprowadzane na samym końcu. Dzięki temu pojemności pasożytnicze nie są wykrywane jako kondensator, a pozostałe elementy są poprawnie identyfikowane.

4.3. Badanie diody

Jak wspomniano w rozdziale **Testowane elementy**, dioda jest elementem półprzewodnikowym, który w standardowych układach pracy przewodzi prąd tylko w jednym kierunku. Podczas projektowania algorytmu, był to główny warunek sprawdzany podczas przeprowadzanie testów, w celu wykrycia diody. Cały algorytm jest bardzo podobny do tego, który służy do testowania rezystancji – rys. 4.1.1. Zmianą w algorytmie jest brak wyboru zakresu oraz zadanie „Oblicz rezystancję” zamieniono na „Oblicz napięcia przewodzenia diody”. Przykładowy schemat testowania diody przedstawiono na rys. 4.3.1.



Rys. 4.3.1. Przykładowy schemat testowania diody

Na samym początku program zakłada, że jeden z testowanych pinów jest anodą, a inny wybrany pin - katodą. Pin testowy przyjęty za anodę jest podłączany przez rezystor do zasilania. Natomiast drugi piny podłączany jest przez rezystory do masy. Przetwornik A/C

zbiera próbki pomiarowe z obu kanałów. Na podstawie wyników określone jest, czy prąd przepływa między dwoma testowanymi pinami. Jeśli nie wykryto przepływu prądu, wybierane są inne piny testowe i testowanie zaczyna się od nowa.

W drugim etapie testowania odwrócona zostaje polaryzacja. Anoda zostaje podłączona do masy, natomiast nóżka przyjęta za katodę do zasilania. W ten sposób dioda zostaje spolaryzowana zaporowo, powinna zablokować przepływ prądu. Jeśli wyniki pomiarowe potwierdzą brak przepływu prądu, element jest ostatecznie uznawany za diodę.

Końcowym etapem po wykryciu elementu jest wyliczenie napięcia przewodzenia diody na podstawie wyników uzyskanych podczas pierwszego pomiaru. Pozycje wykrytych wyprowadzeń zostają zapamiętane, aby wyświetlić użytkownikowi ich układ.

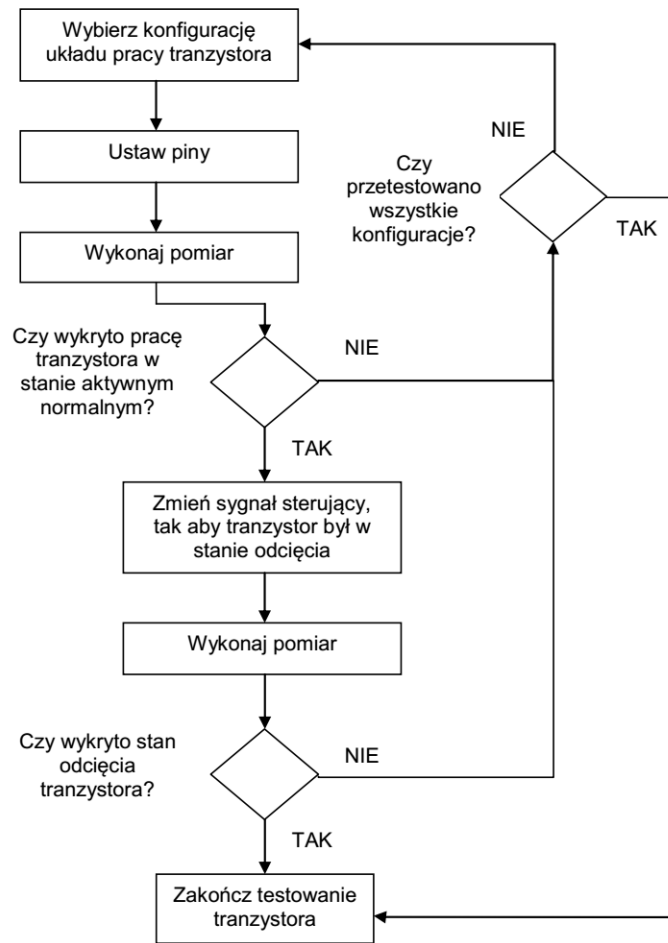
Niewielka modyfikacja algorytmu testowania rezystancji pozwoliła na testowanie diod i uniemożliwiła pomylenie tych dwóch elementów. Nieprawidłowe zidentyfikowanie elementu mogłoby zajść również podczas testowania tranzystora MOSFET, ponieważ posiada on pasożytniczą diodę między drenem a źródłem. W celu wyeliminowania pomyłki wystarczyło testowanie diod umieścić po przeprowadzeniu testowania tranzystorów MOSFET. Podobnie zrobiono z tranzystorami bipolarnymi, w których urządzenie mogłoby wykryć diodę pomiędzy złączem baza – emiter.

4.4. Badanie tranzystorów bipolarnych NPN i PNP

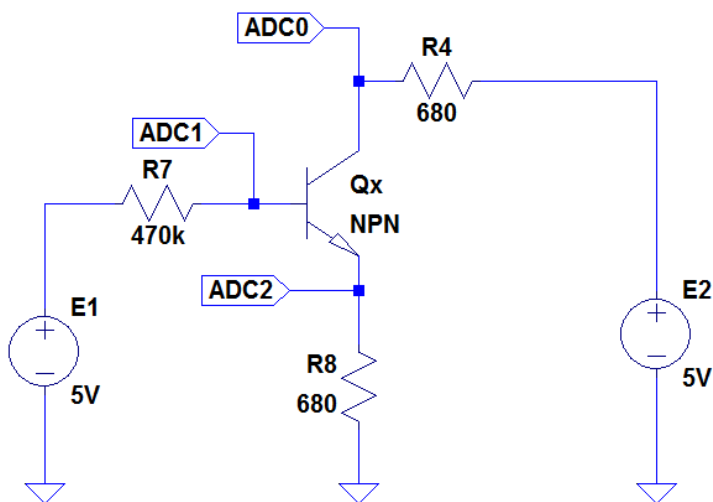
Proces testowania tranzystora bipolarnego polega na przebadaniu elementu jako klucza. Podczas testów nie brane są pod uwagę właściwości tranzystora pracującego w konfiguracji wzmacniacza. Badane są wyłącznie stany aktywny normalny i odcięcia, które całkowicie wystarczają do stwierdzenia, czy badany element rzeczywiście jest tranzystorem bipolarnym. Szczegółowy sposób testowania pokazuje algorytm – rys. 4.4.1.

Tranzystory mogą mieć różny układ pinów, w zależności od obudowy, modelu, dlatego należy przetestować wszystkie możliwe konfiguracje. Jest to pierwszy etap testowania, gdzie program z góry zakłada, na którym pinie testowym znajduje się dane wyprowadzenie tranzystora. Układ testowy, który próbuje znaleźć program dla tranzystora NPN wygląda jak na rys. 4.4.2, natomiast dla tranzystora PNP wygląda jak na rys. 4.4.3.

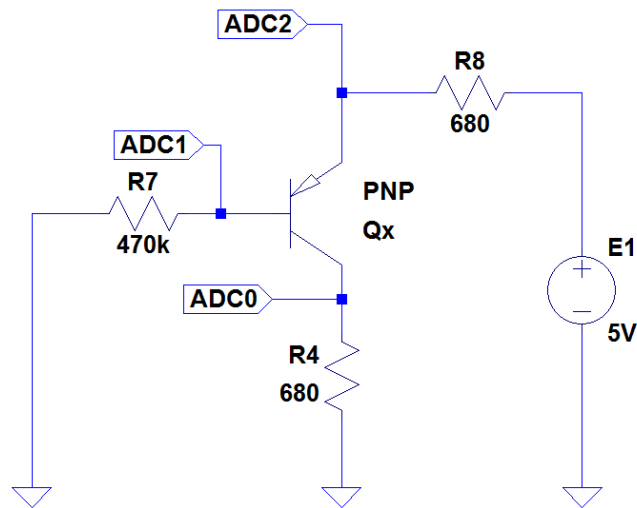
Po wybraniu konfiguracji badany tranzystor należy odpowiednioysterować, tak aby pracował w stanie aktywnym normalnym. Dokonuje się tego wystawiając odpowiednie stany na pinach mikrokontrolera. Poysterowaniu, wykonywany jest pomiar napięć na końcówkach tranzystora i określone jest, czy element rzeczywiście jest w stanie aktywnym normalnym. Jeśli nie to następuje zmiana konfiguracji. Natomiast jeśli pomiary potwierdzają poprawną pracę tranzystora, przychodzi kolej na sprawdzenie stanu odcięcia.



Rys. 4.4.1. Algorytm testowania tranzystora



Rys. 4.4.2. Układ pracy tranzystora NPN w stanie aktywnym normalnym

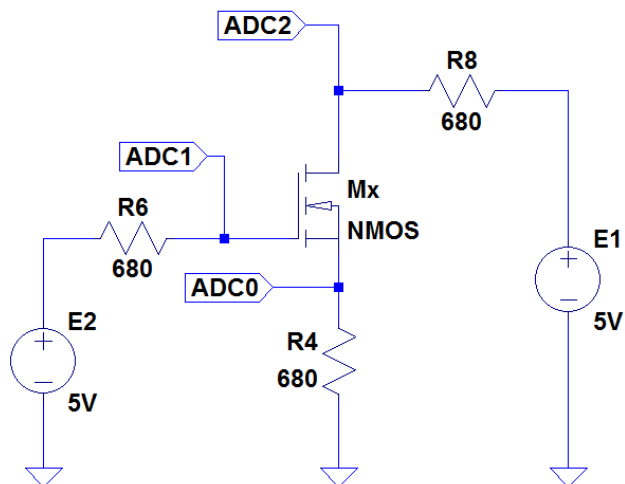


Rys. 4.4.3. Układ pracy tranzystora PNP w stanie aktywnym normalnym

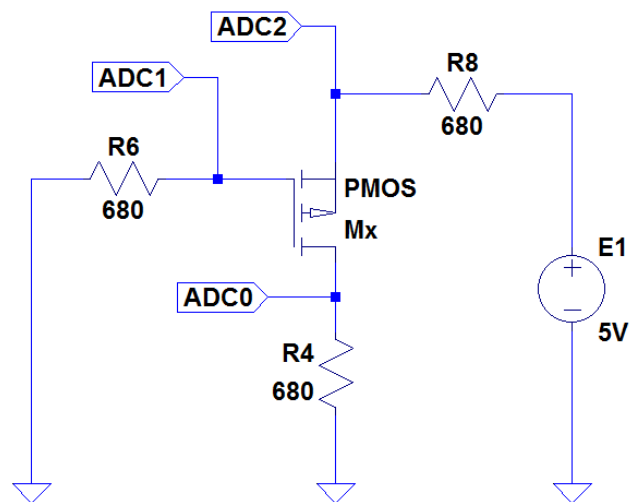
Przedstawiony algorytm badania jest taki sam jak dla tranzystora polowego, dlatego należało wprowadzić sprawdzanie jakiegoś charakterystycznego elementu, który pozwoli odróżnić od siebie oba rodzaje tranzystorów. Do tego celu wykorzystano pomiar napięcia na złączu BE tranzystora bipolarnego, dla tranzystorów krzemowych, najbardziej popularnych, napięcie to powinno wynosić w okolicach 0,7 V.

4.5. Badanie tranzystorów MOSFET z kanałem wzbogaconym typu n i typu p

W przypadku badania tranzystorów MOSFET cały proces jest bardzo podobny do tego, który został przedstawiony w podrozdziale **Badanie tranzystorów bipolarnych NPN i PNP**. Tranzystory polowe również są badane tylko jako klucze. Algorytm badania przebiega dokładnie tak, jak pokazano na rys. 4.4.1. Nieznacznie różną się poszukiwane układy pracy tranzystorów polowych w stanie nasycenia. Dla tranzystora MOSFET typu n układ pracy przedstawiono na rys. 4.5.1, natomiast dla tranzystora typu p na rys. 4.5.2. Zastosowanie rezystora 680 Ω pozwoliło na szybsze przeładowanie pojemności bramki i tym samym przyspieszyło pomiary.



Rys. 4.5.1. Układ pracy tranzystora MOSFET typu n w stanie nasyconym

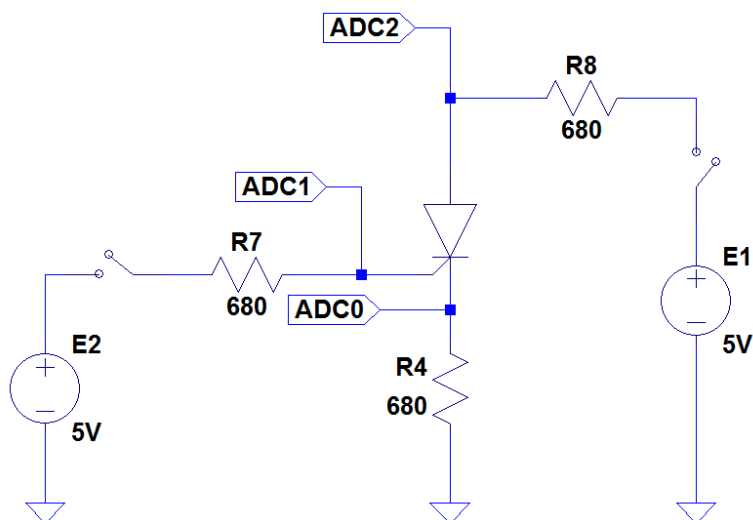


Rys. 4.5.2. Układ pracy tranzystora MOSFET typu p w stanie nasyconym

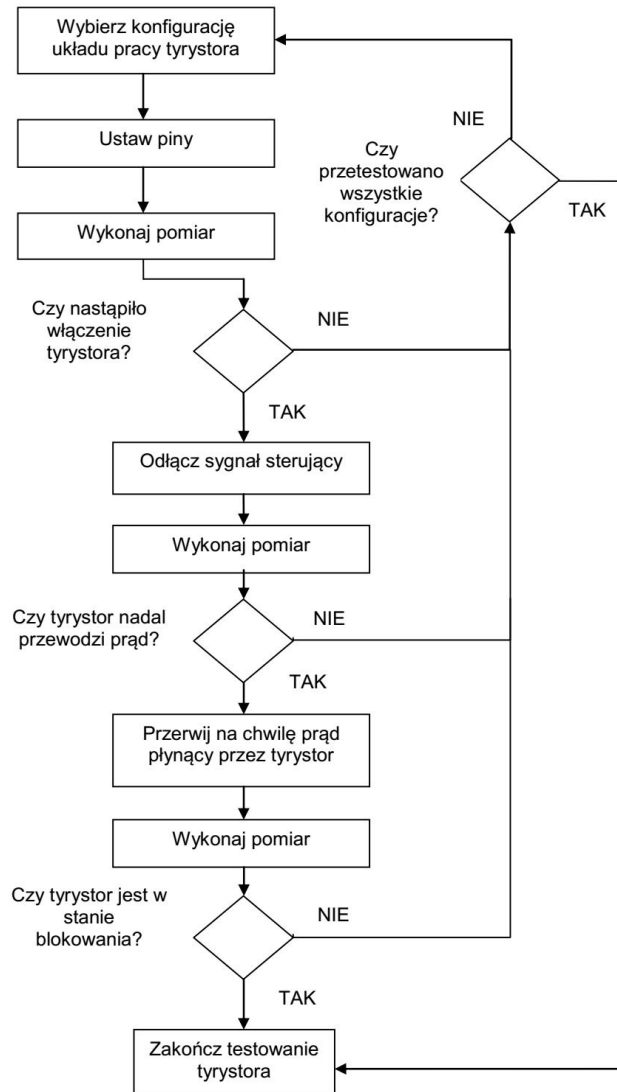
Do rozróżnienia tranzystora polowego od bipolarnego wykorzystano informację o izolacji bramki, wykonanej z dielektryka. Izolacja powoduje, że bramka tranzystora polowego w stanie ustalonym nie pobiera prądu.

4.6. Badanie tyrystora

W badaniu tyrystora, podobnie jak w przypadku badania tranzystorów, ważne jest znalezienie odpowiedniej konfiguracji wyprowadzeń elementu. Program zakłada z góry jedną konfigurację i ją testuje, jeśli wyniki są niepoprawne, to testuje następną konfigurację. Układ, który służy do przetestowania tyrystora przedstawiono na rys. 4.6.1. Natomiast cały proces testowania tyrystora przedstawiono w formie algorytmu - rys. 4.6.2.



Rys. 4.6.1. Układ testowy tyrystora

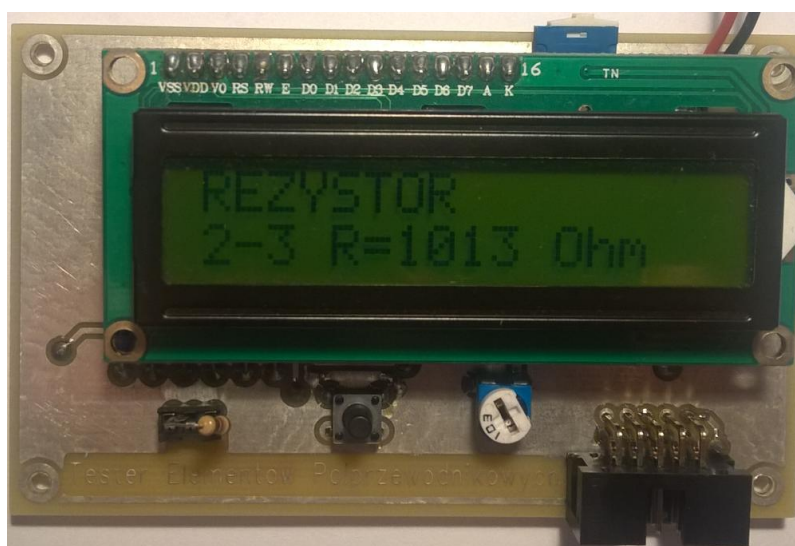


Rys. 4.6.2. Algorytm testowania tyrystora

Pierwszy etap polega na podaniu napięcia na bramkę tyrystora, powoduje to przepływ prądu bazy, który powinien włączyć tyrystor. Następnie obwód bazy jest rozwierany, co nie powinno wpłynąć na działanie tyrystora. Element powinien być nadal włączony. Ostatnim etapem jest chwilowe rozwarcie obwodu anodowego, w celu przełączenia tyrystora w stan blokowania. W każdym etapie wykonywane są pomiary napięć na wyprowadzeniach badanego elementu, w celu sprawdzenia, czy element działa tak, jak powinien.

5. WYNIKI POMIARÓW

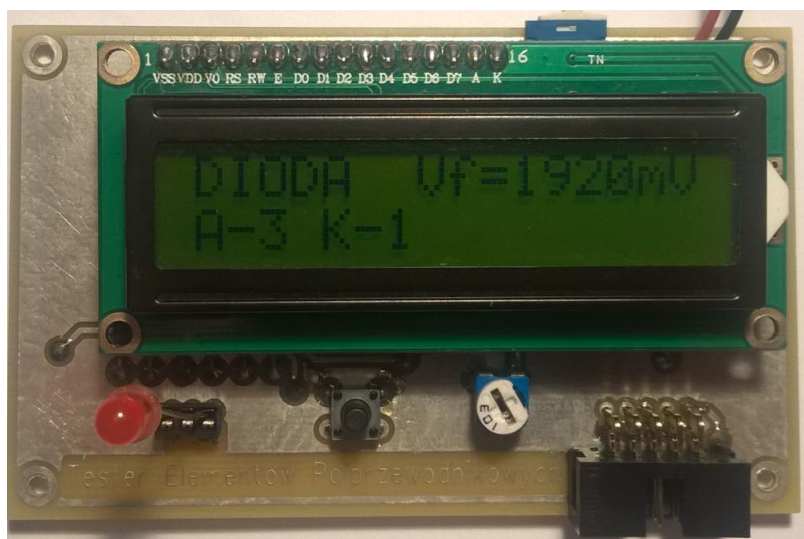
Po złożeniu urządzenia oraz napisania programu, przyszedł czas na sprawdzenie poprawności działania urządzenia. Testowania pozwoliło na wyeliminowanie błędów w oprogramowaniu oraz na zoptymalizowanie kodu. Wyniki testowania pokazano na rys. 5.1 – 5.6. Jak można zauważyć wynikiem testu jest nazwa wykrytego elementu i oznaczenie wyprowadzeń badanego elementu. Dodatkowo tester wyświetla wartość rezystancji dla rezystorów, wartość pojemności dla kondensatorów oraz napięcia przewodzenia dla diod.



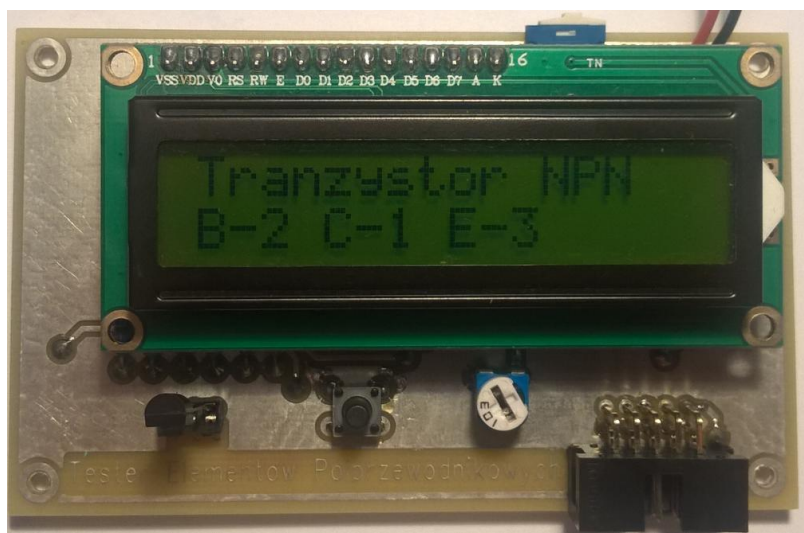
Rys. 5.1. Wynik testowania rezystora



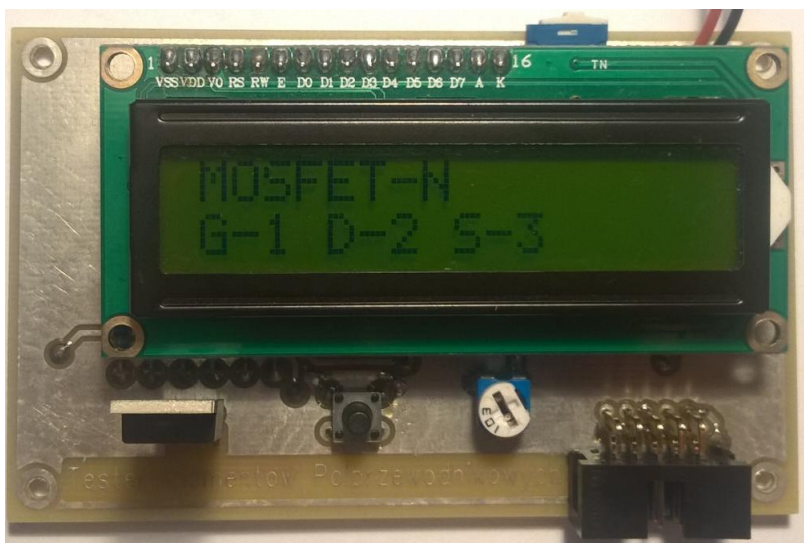
Rys. 5.2. Wynik testowania kondensatora



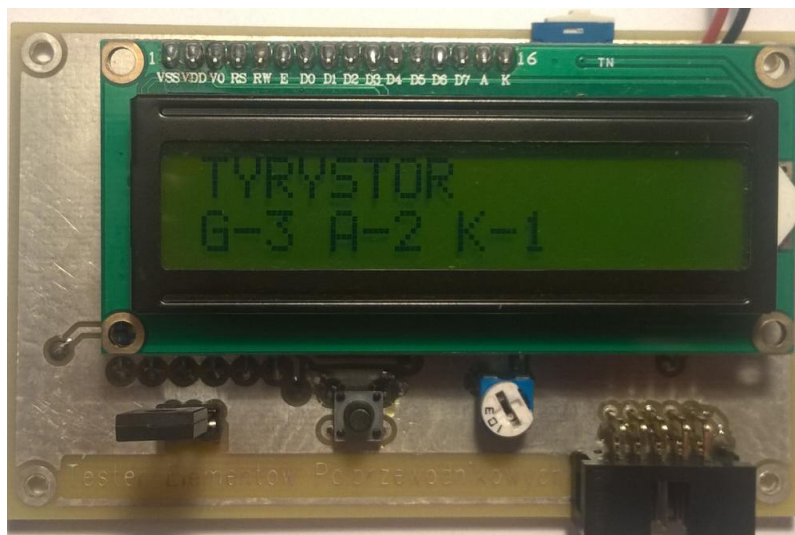
Rys. 5.3. Wynik testowania diody



Rys. 5.4. Wynik testowania tranzystora bipolarnego NPN



Rys. 5.5. Wynik testowania tranzystora MOSFET typu n



Rys. 5.6. Wynik testowania tyrystora

Po przetestowaniu poprawności wykrywania elementów, należało sprawdzić poprawność pomierzonej rezystancji i pojemności. Wyniki pomiarów rezystancji przedstawiono w tabeli 5.1, natomiast wyniki pomiarów pojemności w tabeli 5.2. Jak można zauważyć błąd względny dla pomiarów rezystancji jest w okolicach 3%. Jednak dla pewnych wartości błąd jest znacznie większy. W przypadku pomiarów pojemności błąd względny dochodzi do prawie 9%. W obu pomiarach urządzenie nie jest precyzyjne, dlatego nie powinno być stosowane jako miernik rezystancji czy pojemności, a jedynie do sprawdzenia przybliżonej wartości parametru.

Tabela 5.1. Wyniki pomiaru rezystancji

R [k Ω]	R_{pom} [k Ω]	Błąd względny [%]
0,046	0,046	0,00
0,103	0,097	6,19
0,217	0,217	0,00
0,322	0,323	0,31
0,976	0,992	1,61
1,16	1,177	1,44
2,15	2,218	3,07
4,68	5,024	6,85
9,76	11,592	15,80
100	101	0,99
215	208	3,37
464	473	1,90
1046	1018	2,75

Tabela 5.2. Wyniki pomiaru pojemności

$C [\mu F]$	$C_{pom} [\mu F]$	<i>Błąd względny [%]</i>
0,001	0,001	0,00
0,01	0,01	0,00
0,108	0,103	4,63
0,112	0,112	0,00
4,29	4,6	7,23
9,34	10,151	8,68
26,3	24	8,75
50,5	48	4,95
112	113	0,89

Otrzymana niedokładność pomiarów wynika z zastosowania liczb całkowitych, co wprowadza błędy zaokrągleń. Zamiana obliczeń na arytmetykę zmiennoprzecinkową pozwoliłaby osiągnąć lepsze wyniki, ale wykorzystywany mikrokontroler nie jest przeznaczony do takich operacji, przez co obliczenia na zmiennych przecinkowych zajmują więcej czasu i pamięci. W przypadku pomiarów pojemności na dokładność wpływa także częstotliwość pracy przetwornika A/C. Została ona ustawiona na maksymalną możliwą wartość, więc pomiary pojemności wykonywane są z najwyższą możliwą dokładnością.

6. PODSUMOWANIE

Założeniem projektu inżynierskiego było zaprojektowanie i wykonanie testera elementów elektronicznych. Wymagało to zapoznania się z istniejącymi rozwiązaniami i zaprojektowaniem na ich podstawie działającego urządzenia. W tym celu wykonano schemat ideowy, co wiązało się z wyszukaniem odpowiednich elementów do projektowanego układu. Na podstawie opracowanego schematu ideowego zaprojektowano płytkę drukowaną, a następnie zmontowano urządzenie.

Następnym etapem było wybranie elementów, które tester będzie rozpoznawał. Po wybraniu elementów zebrano o nich informacje, które pozwoliły napisać algorytm testowy. Algorytm posłużył do napisania programu, realizującego funkcjonalność testera elementów półprzewodnikowych. Proces tworzenia oprogramowania był prowadzony równolegle z procesem testowania, w celu sprawdzenia poprawności działania i szybkiej eliminacji błędów.

Urządzenie zostało wykonane i od strony sprzętowej działa poprawnie. Testy wykazały, że urządzenie spełnia swoją rolę, czyli rozpoznaje testowane elementy. Dodatkowo tester jest w stanie wykryć rozmieszczenie wyprowadzeń badanego elementu oraz pomierzyć napięcie przewodzenia diody, rezystancję i pojemność.

W obecnej formie tester nie posiada trybu uśpienia, przez co zużywa więcej energii. W przyszłości można go zmodyfikować i zaprojektować energooszczędny tester. Wiazałoby się to z dodaniem programowego usypiania mikrokontrolera oraz wprowadzeniem wygaszania wyświetlacza po pewnym czasie nieużywania urządzenia. Obecny układ testera nie posiada możliwości włączania lub wyłączania wyświetlacza, dlatego w tym celu należałoby dodać tranzystor, który pełniłby rolę klucza sterowanego przez mikrokontroler.

LITERATURA

1. Frejek M.: AVR - Transistortester, <http://www.mikrocontroller.net/articles/AVR-Transistortester>, (data dostępu 25.10.2016 r.).
2. Karl-Hainz Kübbeler: AVR Transistortester, [http://www.mikrocontroller.net/articles/AVR Transistortester#Software .28English.29](http://www.mikrocontroller.net/articles/AVR_Transistortester#Software_.28English.29), (data dostępu 25.10.2016 r.).
3. Szymaniak R.: Tester elementów elektronicznych, Elektronika Praktyczna, <http://serwis.avt.pl/manuals/AVT5003.pdf>, (data dostępu 25.10.2016 r.).
4. Elektronika (nie tylko) analogowa: Elementy biernie RLC, <http://ea.elportal.pl/elebier.html>, (data dostępu 27.11.2016 r.).
5. Mądrzyk M.: Elementy RLC, <http://zyrardow24h.eu/forum/attachment.php?aid=3176>, (data dostępu 27.11.2016 r.).
6. Galla S.: Bierne elementy przeciwzakłócenia. Wykład z przedmiotu Kompatybilność Elektromagnetyczna, WETI PG, 2016.
7. Horowitz P., Hill W.: Sztuka elektroniki. Część 1. WKŁ, Warszawa, 1996.
8. Polowczyk M., Klugmann E.: Przyrządy półprzewodnikowe. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 1996.
9. Stepowicz W. J.: Elementy półprzewodnikowe i układy scalone. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 1993.
10. Płotka P.: Diody półprzewodnikowe. Wykład z przedmioty Elementy Elektroniczne, WETI PG, 2014.
11. Elektronika (nie tylko) analogowa: Diody, <http://ea.elportal.pl/diody.html>, (data dostępu 29.11.2016 r.).
12. Tietze U., Schenk Ch.: Układy półprzewodnikowe. WNT, Warszawa, 1997.
13. Elektronika (nie tylko) analogowa: Tranzystory bipolarne, <http://ea.elportal.pl/bipolarne.html>, (data dostępu 29.11.2016 r.).
14. Dawidziuk J.: Podstawowe bramki logiczne. Instrukcja z przedmiotu Elementy Elektroniczne, WE PB, 2013, http://we.pb.edu.pl/~kaie/kaie-md/EE/EEPodstawowe_bramki_logiczne.pdf, (data dostępu 30.11.2016 r.).
15. Płotka P.: MOSFET. Wykład z przedmioty Elementy Elektroniczne, WETI PG, 2014.
16. Elektronika (nie tylko) analogowa: Tranzystory polowe, <http://ea.elportal.pl/polowe.html>, (data dostępu 29.11.2016 r.).
17. Kwiatkowski A.: Wykład z przedmiotu Bloki Funkcjonalne Systemów Elektronicznych, WETI PG, 2016.
18. Tyrystory i triaki, IF PWR, <http://www.if.pwr.wroc.pl/~popko/lab%20przyz%20polprz%202011/5.pdf>, (data dostępu 27.11.2016 r.).
19. Andrzejewski M.: Tyrystor, <http://www.zsmeie.torun.pl/glowna/temat/mvs/progr/p13/p13c.pdf>, (data dostępu 30.11.2016 r.).
20. Atmel, ATmega8A Datasheet, 2015.
21. Jasiński P.: Wykłady z przedmiotu Sensory i Sieci Sensorowe, WETI PG, 2015.
22. Wikipedia: Układ RC, [https://pl.wikipedia.org/wiki/Układ RC](https://pl.wikipedia.org/wiki/Uk%C5%82ad_RC), (data dostępu 23.11.2016 r.).

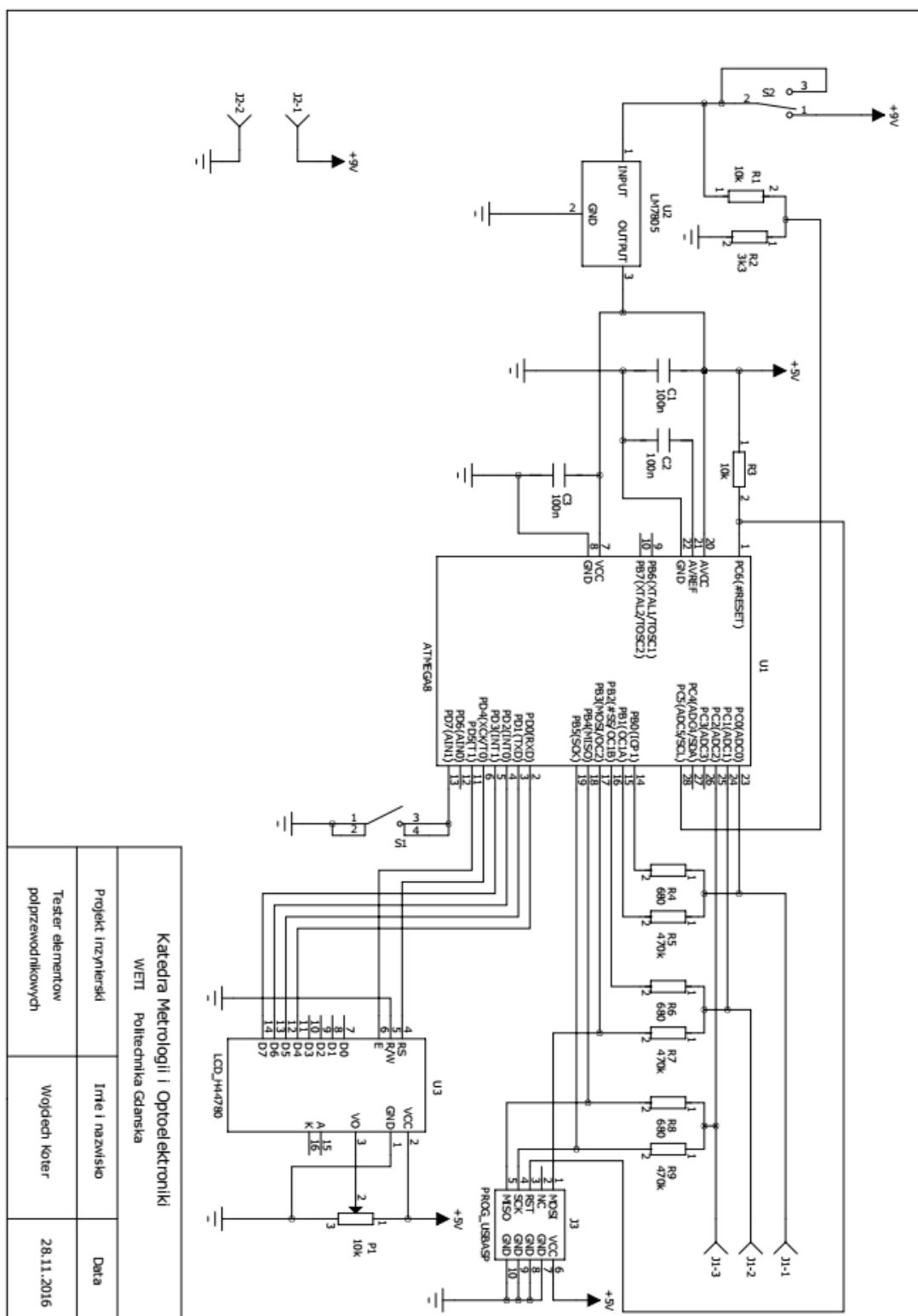
WYKAZ RYSUNKÓW

Rys. 1.1. Złożony tester elementów półprzewodnikowych	9
Rys. 2.3.1. Charakterystyka prądowo – napięciowa diody [11]	12
Rys. 2.4.1. Zakresy pracy tranzystora bipolarnego NPN [8]	13
Rys. 2.5.1. Charakterystyka $I_D(U_{DS})$ dla tranzystora MOSFET typu n [16].....	14
Rys. 2.5.2. Charakterystyka $I_D(U_{GS})$ dla tranzystora MOSFET typu n [16]	14
Rys. 2.6.1. Charakterystyka napięciowo – prądowa tyrystora [18]	15
Rys. 3.1. Schemat blokowy testera	16
Rys. 3.1.1. Układ testowy	17
Rys. 3.1.2. Zasada działania układu testowego.....	17
Rys. 3.2.1. Podłączenie przycisku do mikrokontrolera	19
Rys. 3.2.2. Podłączenie programatora USBasp do mikrokontrolera.....	21
Rys. 3.3.1. Układ zasilania	21
Rys. 3.4.1. Podłączenie wyświetlacza	23
Rys. 4.1.1. Algorytm testowania rezystancji	25
Rys. 4.1.2. Przykładowe ustawienie portów podczas testowania rezystancji	26
Rys. 4.1.3. Uproszczony schemat testowania rezystancji	26
Rys. 4.2.1. Schemat układu RC [22].....	27
Rys. 4.2.2. Odpowiedź skokowa układu RC [22]	28
Rys. 4.2.3. Algorytm testowania pojemności	29
Rys. 4.2.4. Przykładowy schemat testowania pojemności.....	29
Rys. 4.3.1. Przykładowy schemat testowania diody	30
Rys. 4.4.1. Algorytm testowania tranzystora	32
Rys. 4.4.2. Układ pracy tranzystora NPN w stanie aktywnym normalnym.....	32
Rys. 4.4.3. Układ pracy tranzystora PNP w stanie aktywnym normalnym	33
Rys. 4.5.1. Układ pracy tranzystora MOSFET typu n w stanie nasyconym	33
Rys. 4.5.2. Układ pracy tranzystora MOSFET typu p w stanie nasyconym	34
Rys. 4.6.1. Układ testowy tyrystora	34
Rys. 4.6.2. Algorytm testowania tyrystora	35
Rys. 5.1. Wynik testowania rezystora	36
Rys. 5.2. Wynik testowania kondensatora	36
Rys. 5.3. Wynik testowania diody	37
Rys. 5.4. Wynik testowania tranzystora bipolarnego NPN.....	37
Rys. 5.5. Wynik testowania tranzystora MOSFET typu n	37
Rys. 5.6. Wynik testowania tyrystora	38

WYKAZ TABEL

5.1. Wyniki pomiaru rezystancji.....	38
5.2. Wyniki pomiaru pojemności.....	39

Dodatek A: Schemat ideowy



Dodatek B: Lista połączeń

!PADS-POWERPCB-V9.0-MILS-CP1250! NETLIST FILE FROM PADS LOGIC VVX.1.2

REMARK tester.sch -- Thu Dec 01 09:58:40 2016

REMARK

PART ITEMS

U1 ATMEGA8@DIP28-300
U2 LM7805@TO-220
U3 LCD_H44780@GOLDPIN_16
P1 POTENCJOMETR@TRYMER_RM-065
C1 CAP-CC05@CK05
C2 CAP-CC05@CK05
R1 R1/8W@R1/8W
R2 R1/8W@R1/8W
R3 R1/8W@R1/8W
R4 R1/8W@R1/8W
R5 R1/8W@R1/8W
R6 R1/8W@R1/8W
R7 R1/8W@R1/8W
R8 R1/8W@R1/8W
R9 R1/8W@R1/8W
C3 CAP-CC05@CK05
S1 SW-NO@MICROSWITCH
S2 SW-BI@SLIDE-SWITCH
J1 GNIAZDO-3P@GOLDPIN_3
J2 GNIAZDO-2P@GNIAZDO-2P_KIJANKA
J3 PROG_USBASP@KANDA_10_KATOWE

NET

SIGNAL +9V

S2.1 J2.1

SIGNAL +5V

U1.7 C1.1 U2.3 C3.1 R3.1

U1.20 P1.1 U3.2 J3.6

SIGNAL GND

U2.2 C3.2 U1.22 C1.2 C2.1

S1.1 P1.3 U3.1 U3.5 U1.8

R2.2 J2.2 S1.2 J3.7 J3.8

J3.9 J3.10

SIGNAL \$\$\$2752

U1.21 C2.2

SIGNAL \$\$\$3173

R3.2 J3.3 U1.1

SIGNAL \$\$\$13708

R1.1 S2.3 S2.2 U2.1

SIGNAL \$\$\$3319

U1.14 R4.2

SIGNAL \$\$\$3330

U1.15 R5.2

SIGNAL \$\$\$3334

U1.16 R6.2

SIGNAL \$\$\$3336

U1.17 J3.1 R7.2

SIGNAL \$\$\$3339

U1.18 J3.5 R8.2

SIGNAL \$\$\$3343

U1.19 J3.4 R9.2

SIGNAL \$\$\$3351

R4.1 U1.23 R5.1 J1.1

SIGNAL \$\$\$3356

R6.1 U1.24 R7.1 J1.2

SIGNAL \$\$\$3360

R8.1 U1.25 R9.1 J1.3

SIGNAL \$\$\$14911

U1.13 S1.3 S1.4

SIGNAL \$\$\$3827

U1.6 U3.4

SIGNAL \$\$\$3831

U1.11 U3.6

SIGNAL \$\$\$3864

U3.11 U1.2

SIGNAL \$\$\$3871

U1.3 U3.12

SIGNAL \$\$\$3876

U3.13 U1.4

SIGNAL \$\$\$3881

U1.5 U3.14

SIGNAL \$\$\$4026

U3.3 P1.2

SIGNAL \$\$\$4281

R1.2 U1.28 R2.1

END OF ASCII OUTPUT FILE

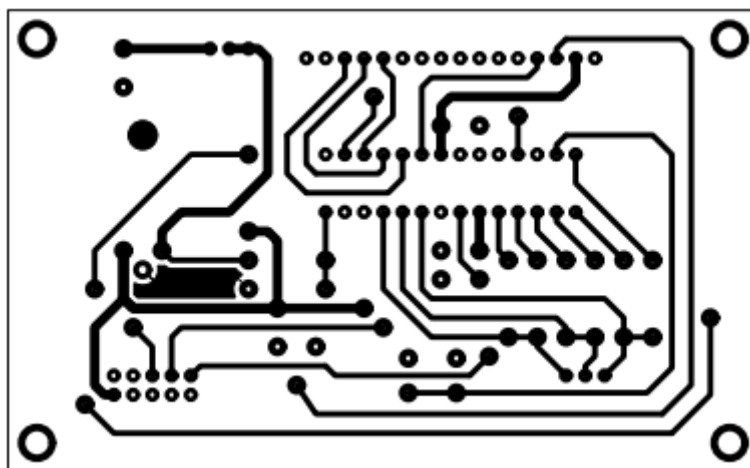
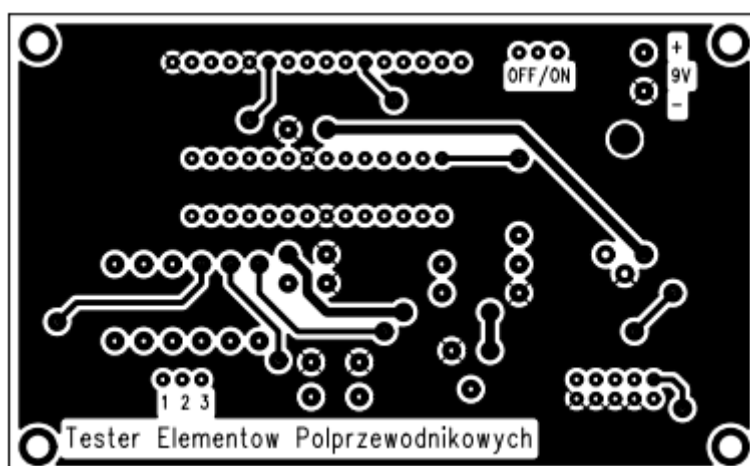
Dodatek C: Wykaz elementów

Bill Of Materials for tester.sch on Thu Dec 01 10:06:29 2016				

Item	Qty	Reference	Part Name	Description

1	1	U1	ATMEGA8	
2	3	C1-3	CAP-CC05,100n, ???	RADIAL CERAMIC CAPACITOR, MIL-SPEC SIZE CK05
3	1	J2	GNIAZD0-2P	
4	1	J1	GNIAZD0-3P	
5	1	U3	LCD_H44780	
6	1	U2	LM7805	
7	1	P1	POTENCJOMETR, 10k	
8	1	J3	PROG_USBASP	
9	2	R1 R3	R1/8W,10k	RES BODY:060 CENTERS:400
10	1	R2	R1/8W,3k3	RES BODY:060 CENTERS:400
11	3	R5 R7 R9	R1/8W,470k	RES BODY:060 CENTERS:400
12	3	R4 R6 R8	R1/8W,680	RES BODY:060 CENTERS:400
13	1	S2	SW-BI	COBA MT-1100 SPDT MOMENTARY PUSHBUTTON SWITCH
14	1	S1	SW-NO, ???	SPST Switch 1:C 2:NO

Dodatek D: Mozaika płytki drukowanej



Dodatek E: Schemat montażowy

