

STRESZCZENIE PRACY

W niniejszym projekcie dyplomowym opracowano i zrealizowano układ laboratoryjny, którego celem jest dokładne wyznaczenie wilgotności względnej przy zastosowaniu czujnika pojemnościowego. Metoda pomiaru odbywa się w dziedzinie czasu i opiera się na uniwersalnym interfejsie dla mikrokontrolerów z wewnętrznym układem przechwytywania zdarzenia. Układ pomiarowy bazuje na precyzyjnych komparatorach, z zapewnieniem dokładnych napięć referencyjnych.

Opracowano i przetestowano prototyp kompaktowego, pojemnościowego układu laboratoryjnego opartego na 8-bitowym mikrokontrolerze ATmega32U4. Przeanalizowano maksymalną możliwą niedokładność pośrednio mierzonej pojemności, a także przeprowadzono badania eksperymentalne. Wyniki potwierdziły, że maksymalny błąd względny wartości pojemności wyniósł mniej niż XX%, co odpowiada dokładności pomiaru XX pF dla zakresu mierzonych wartości pomiędzy 100 pF a 300 pF, co z kolei odpowiada co najmniej XX% rozdzielczości wilgotności względnej dla komercyjnych czujników RH tj. HS1101 czy Philips H1.

Słowa kluczowe:

czujnik, układ laboratoryjny, mikrokontroler, układ przechwytywania, uniwersalny interfejs, dziedzina czasu, pojemność, wilgotność względna, ATmega32U4, HS1101

Dziedzina nauki i techniki, zgodnie z wymaganiami OECD:

Nauki inżynierskie i techniczne: elektrotechnika, elektronika i inżynieria informatyczna

ABSTRACT

In this diploma project, a laboratory system was developed and implemented, the purpose of which is to accurately determine the relative humidity with the use of a capacitive sensor. The measurement method takes place in the time domain and is based on a universal interface for microcontrollers with an internal event capture circuit. The measuring system is based on precise comparators, ensuring precise reference voltages.

A prototype of a compact, capacitive laboratory circuit based on the ATmega32U4 8-bit microcontroller was developed and tested. The maximum possible inaccuracy of indirectly measured capacitance was analyzed, and experimental studies were also carried out. The results confirmed that the maximum relative error of the capacitance value was less than XX%, which corresponds to the measurement accuracy of XX pF for the range of measured values between 100 pF and 300 pF, which in turn corresponds to at least XX% resolution of the relative humidity for commercial RH sensors, i.e. HS1101 or Philips H1.

Keywords:

sensor, laboratory system, microcontroller, input capture, universal interface, time domain measurement, capacity, relative humidity, ATmega32U4, HS1101

The field of science and technology, in line with the OECD requirements:

Engineering and technical sciences: electrical engineering, electronics and information engineering

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

ICP	– <i>Input Capture</i>	–
USB	– <i>Universal Serial Bus</i>	–
MCU	– <i>Microcontroller Unit</i>	–
PC	– <i>Personal Computer</i>	–
XOR	– <i>Exclusive OR</i>	–
GUI	– <i>Graphical User Interface</i>	–
XML	– <i>Extensible Markup Language</i>	– <i>rozszerzalny język znaczników</i>
PCB	– <i>Printed Circuit Board</i>	– <i>obwód drukowany</i>

Spis treści

1	Wstęp i cel pracy.....	9
2	Przegląd metod pomiarowych.....	10
2.1	Metoda oparta na przesuwniku fazowym.....	10
2.2	Metoda.....	10
2.3	Metoda.....	10
2.4	Metoda ładowania/rozładowania RC.....	10
2.5	Wybór metody pomiarowej.....	10
3	Badania symulacyjne	11
3.1	Analiza operatorowa obwodu	11
3.2	Symulacja SPICE	13
3.2.1	Podbloki układu	13
3.2.2	Wyniki.....	16
4	Budowa układu laboratoryjnego.....	18
4.1	Stanowisko laboratoryjne	18
4.2	Inteligentny czujnik pojemnościowy	19
4.3	Układ zasilania	20
4.4	Moduł Arduino Micro	21
4.5	Moduł SHTC3	22
4.6	Moduł LCD.....	23
4.7	Układ pomiarowy.....	24
4.8	Złącza diagnostyczne.....	27
4.9	Layout PCB	27
4.9.1	Projekt	27
4.9.2	Realizacja.....	27
5	Użyte Układy peryferyjne mikrokontrolera	29
5.1	System przerwań.....	29
5.2	USB – Universal Serial Bus.....	30
5.3	ICP – Input Capture.....	31
5.4	TWI – Two Wire Interface.....	32
6	Oprogramowanie mikrokontrolera.....	34
6.1	Struktura programu	34
6.2	Inicjalizacja urządzenia	34
6.3	Pętla główna programu	34
6.4	Funkcje urządzenia	34
6.4.1	Kalibracja.....	34
6.4.2	Pomiar temperatury i wilgotności względnej	34
7	Interfejs użytkownika na komputerze PC.....	35
7.1	Strona startowa	35

7.2	Ustawienia ogólne	35
7.2.1	Eksport wyników pomiarowych do programu Matlab	35
7.2.2	Eksport dziennika zdarzeń	35
7.3	Kalibracja	35
7.4	Funkcje pomiarowe	35
7.5	Charakterystyki pomiarów	35
7.6	Dziennik zdarzeń	35
8	Weryfikacja eksperymentalna	35
8.1	Stanowisko pomiarowe	35
8.2	Pomiar pojemności wzorcowych	35
8.3	Korekcja pomiarów	35
8.3.1	Algorytm regresji liniowej	35
8.3.2	Algorytm interpolacji Lagrange'a	35
9	Podsumowanie	35
	Wykaz literatury	36
	Wykaz rysunków	37
	Wykaz tabel	38
	Wykaz listingów	39
	Dodatek A – schemat ideowy układu pomiarowego	40
	Dodatek B – schemat montażowy układu pomiarowego	40

1 WSTĘP I CEL PRACY

2 PRZEGLĄD METOD POMIAROWYCH

2.1 *Metoda oparta na przesuwniku fazowym*

2.2 *Metoda*

2.3 *Metoda*

2.4 *Metoda ładowania/rozładowania RC*

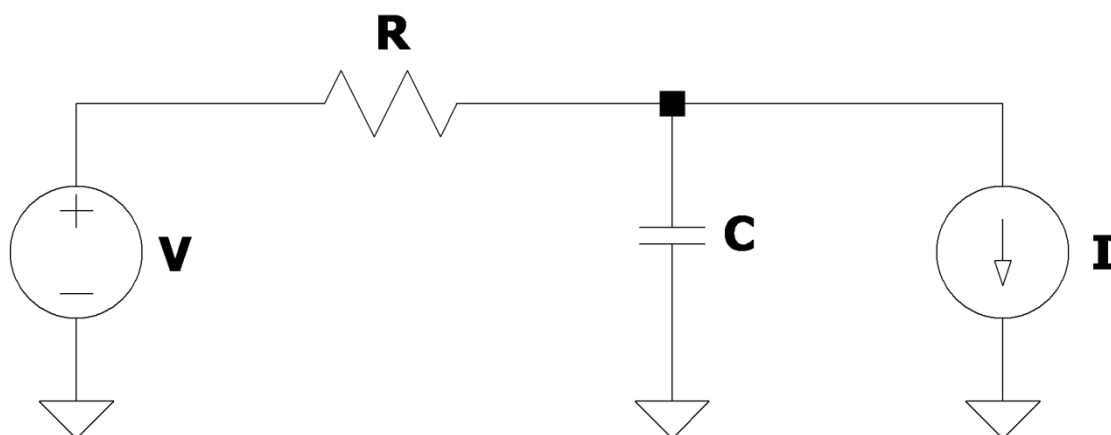
2.5 *Wybór metody pomiarowej*

3 BADANIA SYMULACYJNE

W rozdziale zostanie wyprowadzony model matematyczny obwodu, z wykorzystaniem analizy operatorowej, a także zostaną przedstawione teoretyczne charakterystyki przy użyciu programu Matlab. Przeprowadzono również szczegółową symulację obwodu w programie typu SPICE, obrazując wystąpienie pasożytniczych elementów.

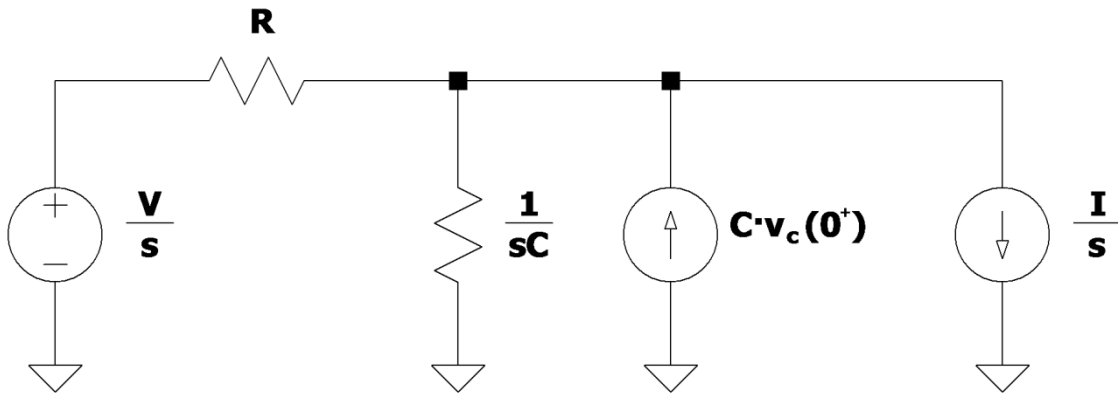
3.1 Analiza operatorowa obwodu

Obwód pomiarowy można przedstawić przy pomocy idealnych źródeł prądowych i napięciowych. Źródło prądowe (I) występujące na rysunku 3.1.A symbolizuje prąd wejściowy komparatorów (prąd polaryzujący tranzystory wejściowe układu scalonego). Zgodnie z dokumentacją układu TLV3502AID, prąd ten może osiągać maksymalne wartości ± 20 [pA]. Źródło napięciowe (V) odpowiada natomiast napięciu na wyjściu układu buforującego.



Rys 3.1. Obwód pomiarowy.

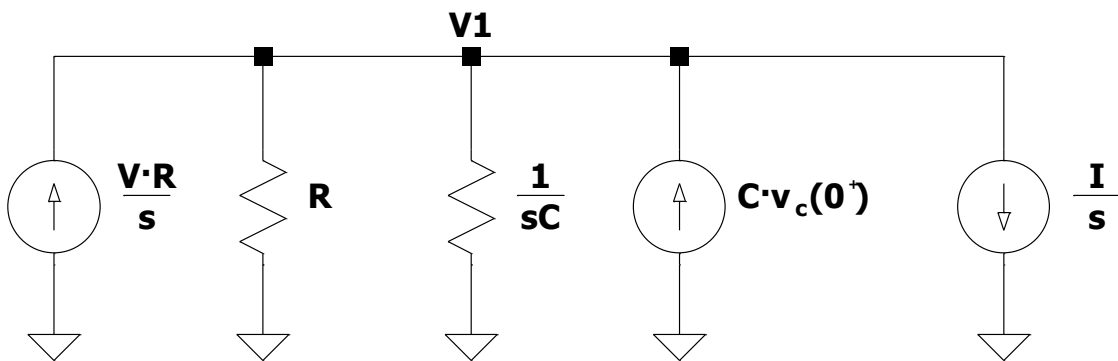
Przyjmując, że stan napięcia na wyjściu mikrokontrolera zmienił się w sposób skokowy, w chwili $t = 0$, w układzie pomiarowym będzie obowiązywać stan nieustalony. Do opisu matematycznego takich stanów służy analiza operatorowa. Wynik przekształcenia znajduje się na rysunku 3.1.B.



Rys 3.2. Analiza operatorowa obwodu pomiarowego.

Pojemność C zastąpiono równoległym połączeniem rezystancji o wartości $\frac{1}{s \cdot C}$ oraz źródła prądowego o wartości $C \cdot v_c(0^+)$, gdzie $v_c(0^+)$ oznacza wartość chwilową napięcia na pojemności w chwili czasu $t \rightarrow 0^+$. Rezystancja R ma charakter liniowy, dlatego nie podlega przekształceniom operatorowym.

Do rozwiązania układu wykorzystano metodę potencjałów węzłowych, w tym celu należało dokonać kolejnego przekształcenia, w którym zamieniono rzeczywiste źródło napięciowe utworzone z elementów rezystancji R oraz źródła $\frac{V}{s}$, na rzeczywiste źródło prądowe. Realizacja tego etapu znajduje się na rysunku 3.1. C.



Rys 3.3. Przekształcony obwód pomiarowy w dziedzinie operatorowej.

Dysponując modelem obwodu z rysunku 3.1. C można wyprowadzić wzór na napięcie w węźle V1, czyli na badanej pojemności C :

$$V1 = \frac{V \cdot \frac{R}{s} + C \cdot v_c(0^+) - \frac{I}{s}}{\frac{1}{R} + s \cdot C}$$

Po przekształceniach wzoru XXX oraz dokonaniu odwrotnej transformaty Laplace'a otrzymano wzór opisujący napięcie w dowolnej chwili czasu stanu nieustalonego.

$$V1 = V + \exp\left(-\frac{t}{R \cdot C}\right) \cdot \left(v_c(0^+) - V + \frac{I}{R}\right) - I \cdot R$$

Podobnie przekształcając wzór uzyskano zależność czasu ładowania/rozładowania pojemności od wartości tej pojemności.

$$t = -C \cdot R \cdot \log\left(\frac{V1 - V + I \cdot R}{v_c(0^+) - V + I \cdot R}\right)$$

Wartość pojemności w zależności od czasu ładowania/rozładowania zaprezentowano we wzorze XXX. Parametry V, I oraz R przyjmują stałą wartość na czas trwania stanu nieustalonego.

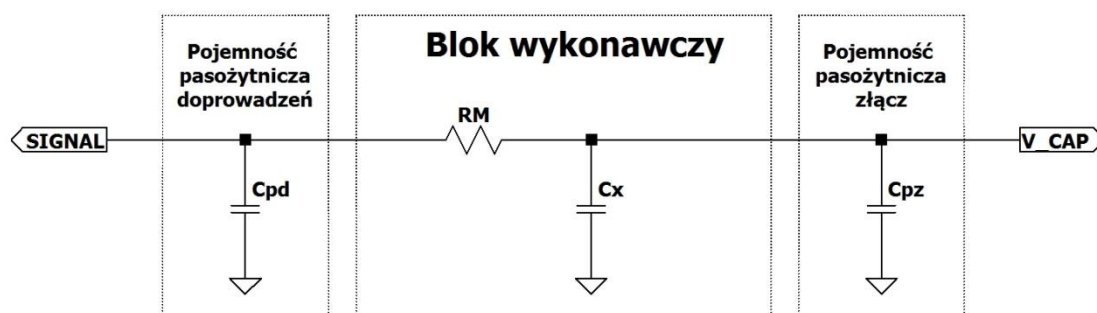
$$C = \frac{-t}{R \cdot \log\left(\frac{V1 - V + I \cdot R}{v_c(0^+) - V + I \cdot R}\right)}$$

3.2 Symulacja SPICE

Opis matematyczny udowodnił, że pomiar wartości pojemności, w idealnych warunkach jest możliwy poprzez zmierzenie czasu ładowania/rozładowania pojemności. W podrozdziale poddano analizie obwód pomiarowy z uwzględnieniem pojemności pasożytniczych ścieżek PCB, oraz tranzystorów obwodów wejściowych wykorzystanych układów scalonych.

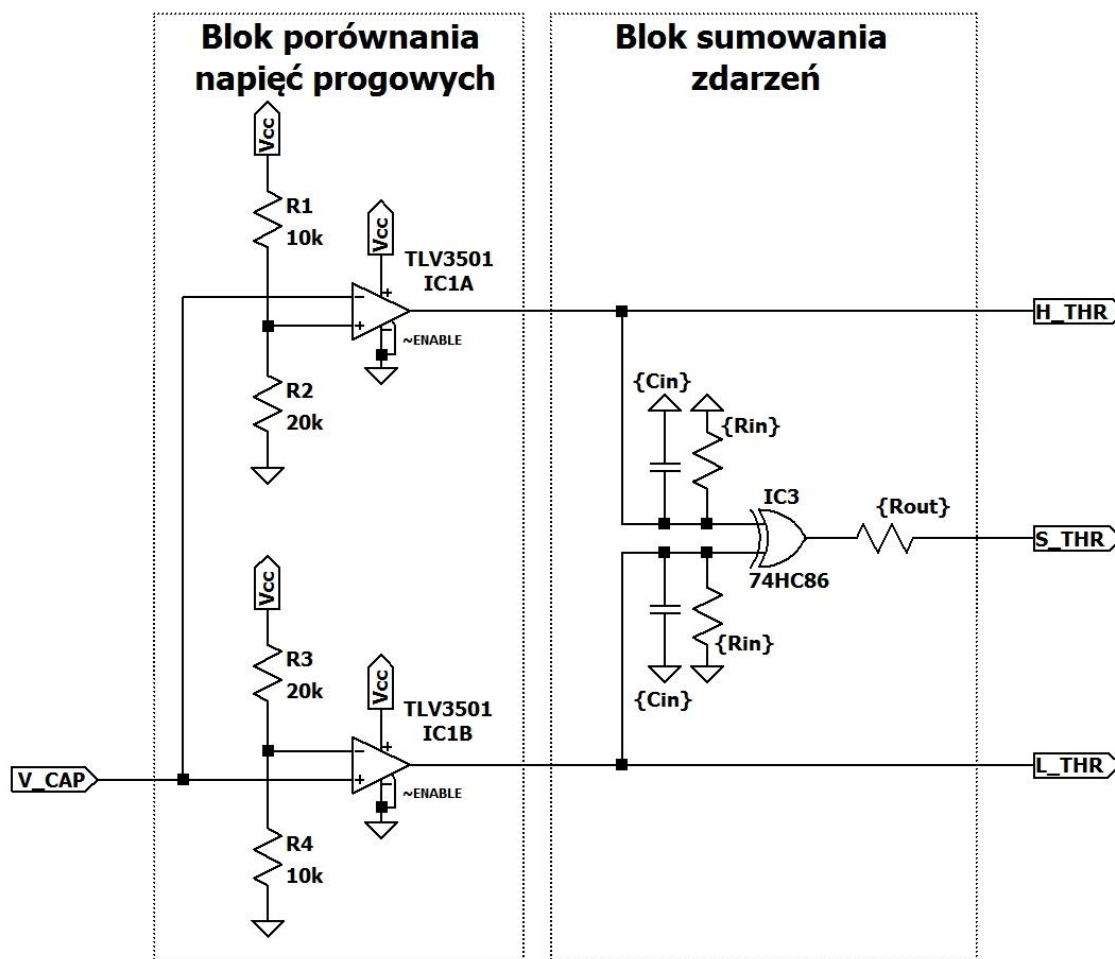
3.2.1 Podbloki układu

Blok układu pomiarowego zaprezentowano na rysunku 3.2.1.A. Blok ten symuluje pojemności pasożytnicze związane ze ścieżkami doprowadzającymi oraz pojemności złącz pomiarowych i diagnostycznych. Do wyprowadzenia SIGNAL dołączono jedno z wyjść mikrokontrolera poprzez trójstanowy bufor.



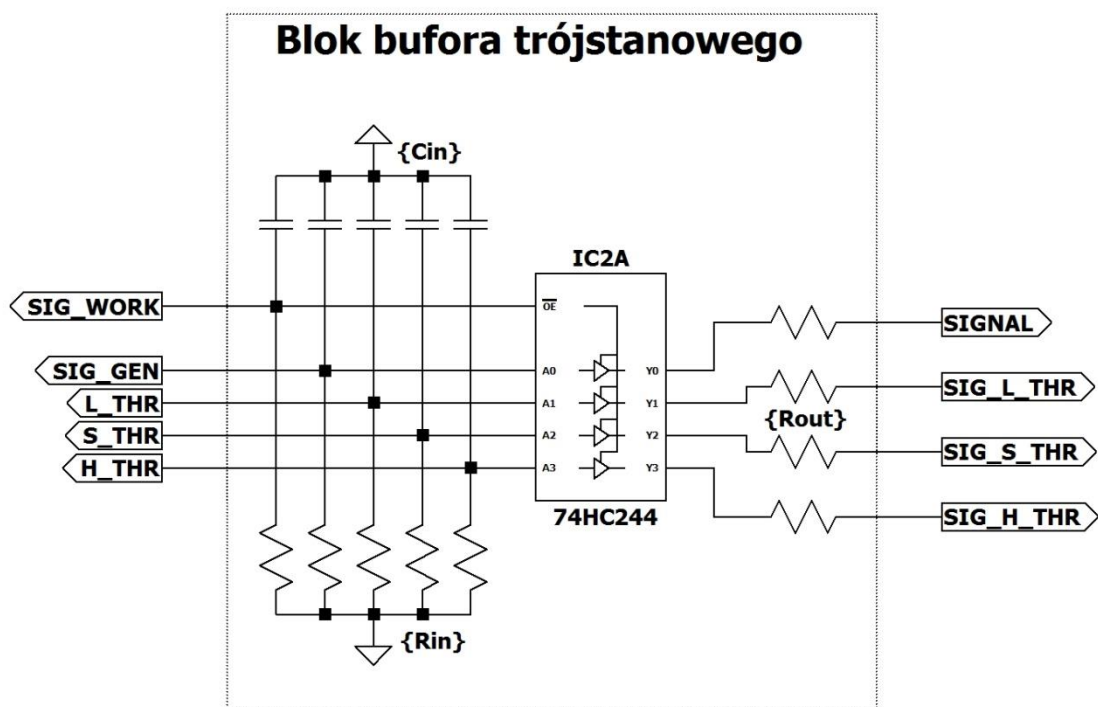
Rys 3.4. Schemat bloku pomiarowego – symulacja.

Blok przetwarzający napięcie występujące na badanej pojemności składa się z dwóch identycznych komparatorów, które porównują poziom napięcia do zadanych progów. Jeżeli napięcie uzyska poziom większy od górnego progu, lub mniejszy od dolnego progu, będzie to skutkowało ustaleniem stanu wysokiego na wyjściu bramki XOR.



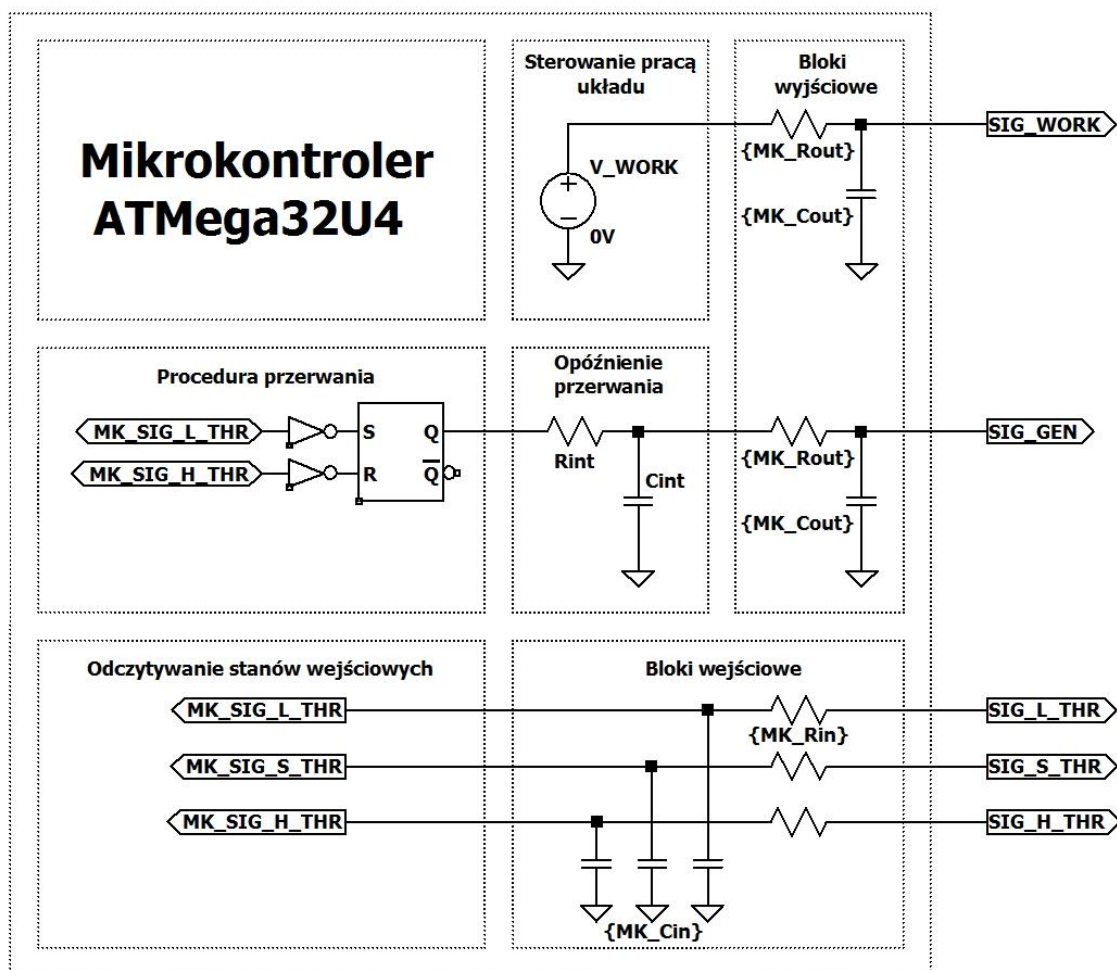
Rys 3.5. Schemat bloku porównywania napięć progowych – symulacja.

Blok bramki trójstanowej obejmuje pojemności i rezystancje pasożytnicze wejść układu. Wykorzystane do projektu bramki i bufory są wykonane w technologii CMOS, która cechuje się pojemnością pasożytniczą bramki tranzystora oraz niewielkim prądem upływu. Te parametry zostały zaimplementowane na poczet symulacji w postaci pojemności C_{in} oraz rezystancji R_{in} . Podobna zasada występuje na wyjściach bramek, załączony jeden z tranzystorów *pull up* lub *pull down*, posiada niezerową rezystancję dren – źródło, co zostało również wzięte pod uwagę w postaci rezystancji R_{out} na wyjściach. Do projektu wykorzystano bufor, ponieważ parametry jego wyjść są bardziej optymalne w porównaniu do wyjść mikrokontrolera (mniejsze pojemności i rezystancje pasożytnicze).



Rys 3.6. Schemat bufora trójstanowego – symulacja.

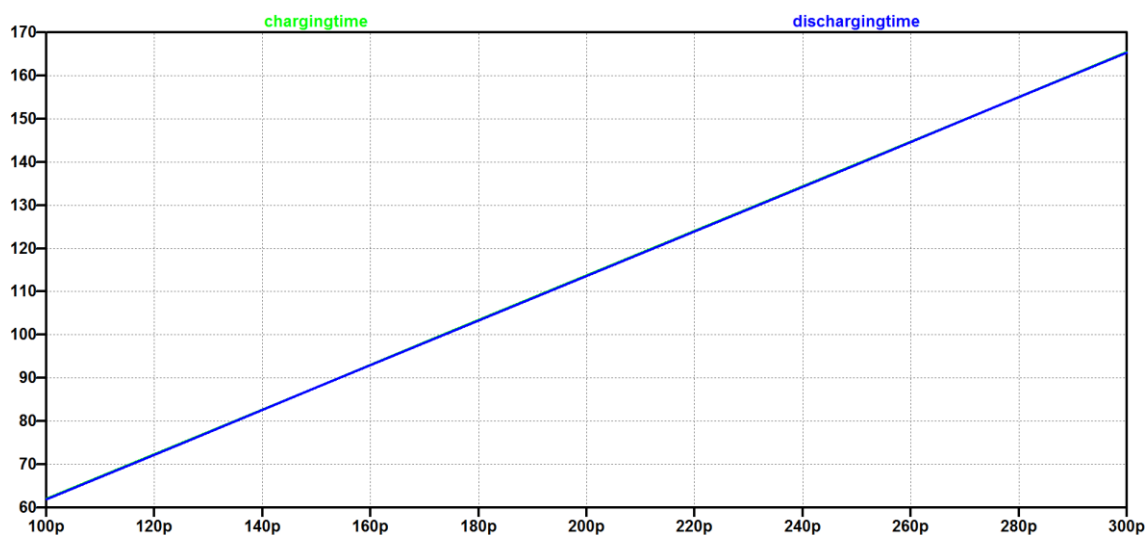
Blok symulujący działanie mikrokontrolera przewiduje inne wartości pojemności i rezystancji pasożytniczej wejść oraz wyjść układu scalonego, związane to jest z poziomem integracji struktury krzemowej. Na potrzeby symulacji zaimplementowano uproszczoną obsługę przerwania składającą się z przerzutnika *RS*. Z wywołaniem przerwania ściśle związane jest również opóźnienie jakie wnosi wykonanie kolejnych instrukcji wewnątrz jego obsługi, z tego względu zastosowano człon opóźniający, symulujący czas wykonania przerwania.

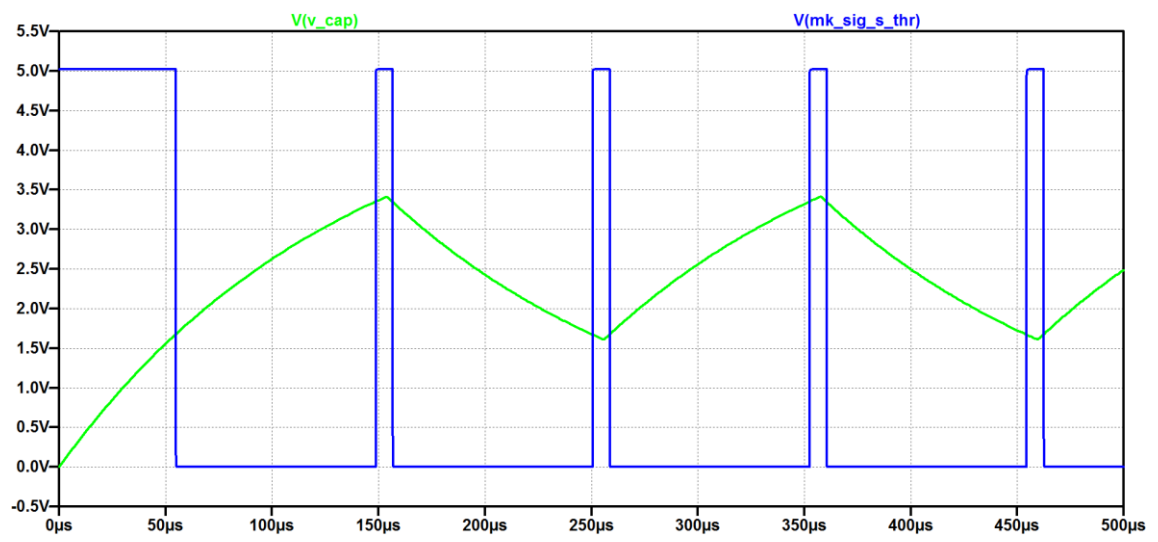
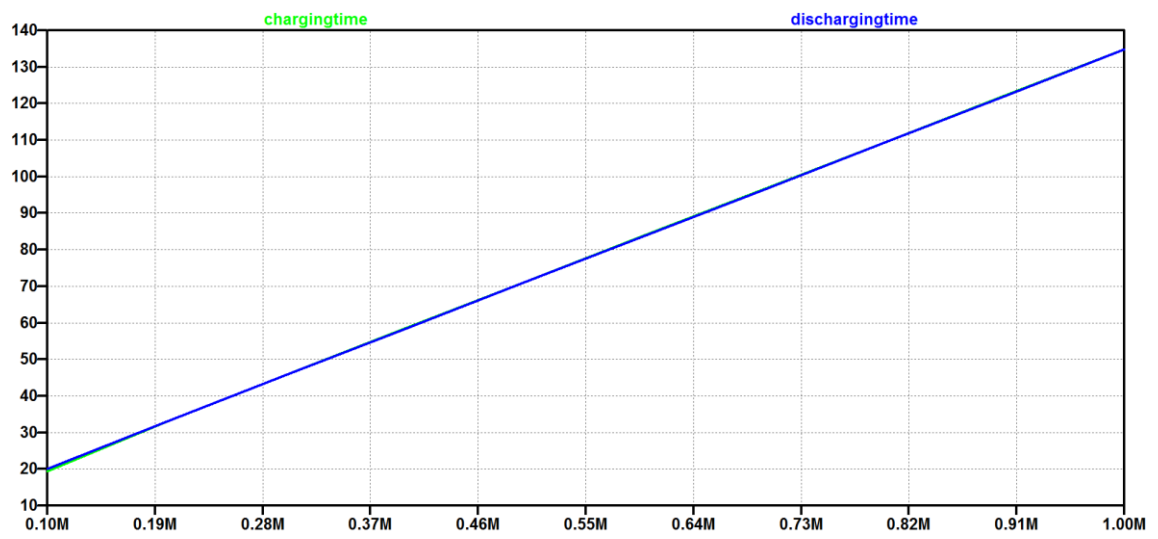


Rys. 3.7. Schemat podłączenia mikrokontrolera – symulacja.

3.2.2 Wyniki

Symulacje przeprowadzono dla zakresu pojemności od 100 do 300 [pF]



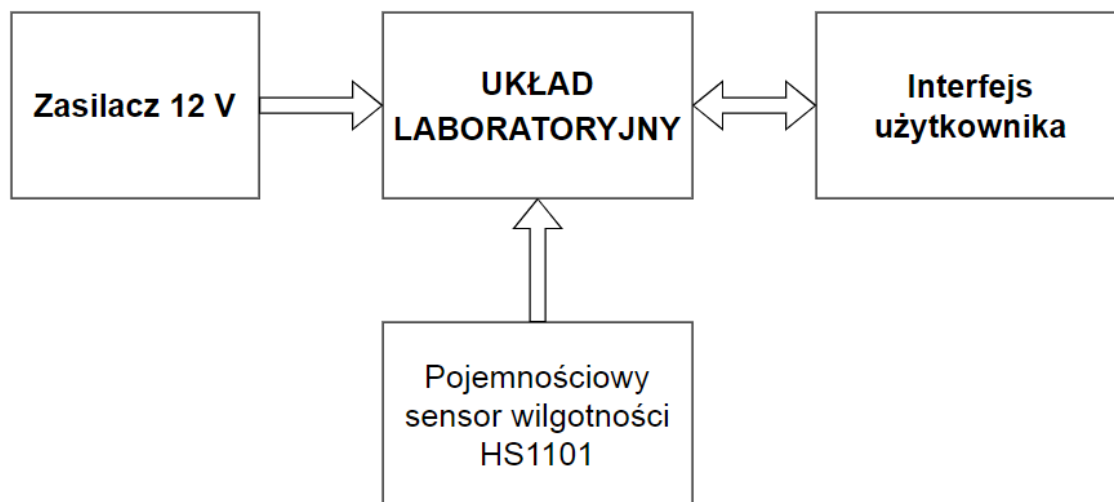


4 BUDOWA UKŁADU LABORATORYJNEGO

W rozdziale zostanie zaprezentowana realizacja fizycznego układu inteligentnego czujnika pojemnościowego. Szczególną uwagę poświęcono omówieniu podukładów zasilania, obwodu pomiarowego, a także modułów Arduino Micro, czujnika temperatury i wilgotności względnej SHTC3 oraz wyświetlacza alfanumerycznego LCD.

4.1 Stanowisko laboratoryjne

Możliwość pomiaru układem laboratoryjnym jest możliwa tylko przy użyciu interfejsu użytkownika (rys 4.1). Interfejs ten pozwala na pomiar jednokrotny pojemności czujnika HS1101, oraz wielokrotny, z zaprogramowanym odstępem czasu. Ukazuje wyniki pomiarowe w aplikacji okienkowej. Oprócz pomiarów udostępnia funkcję kalibracji układu pomiarowego. Kalibracja umożliwia pomiar poziomu napięcia na wyjściach bufora trójstanowego, który taktuje blok pomiarowy. Interfejs użytkownika zapewnia także wszelkie obliczenia, oraz generuje skrypt programu Matlab, w którym użytkownik może dostosować do swoich wymagań wyniki pomiarowe. Interfejs użytkownika udostępnia możliwość zmian ustawień układu laboratoryjnego, m. in. poziomy napięć progowych i zasilania, czy współczynniki korekcji. Wartości nastaw są zapamiętywane w pamięci trwałej układu laboratoryjnego i aktualizowane wraz z podłączeniem do interfejsu. Dzięki wykorzystaniu protokołu USB interfejs użytkownika dokonuje automatycznej detekcji podłączonego układu i nawiązuje z nim połączenie.

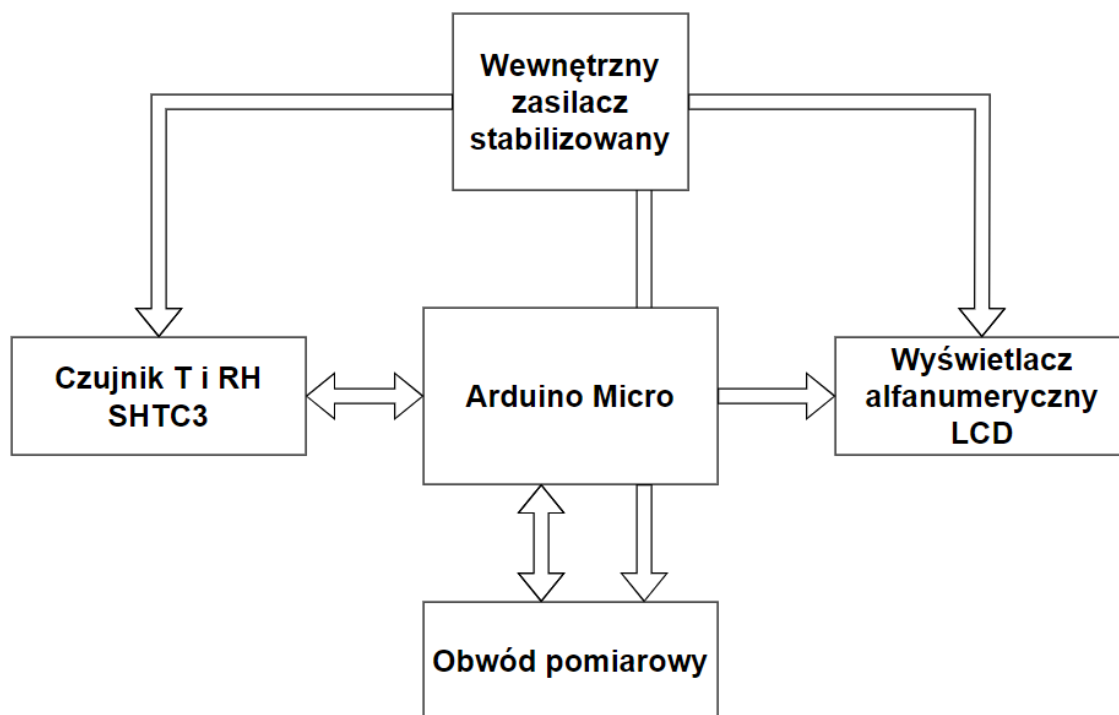


Rys 4.1. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego.

Do poprawnego działania układu laboratoryjnego wymagane jest zewnętrzne napięcie zasilające, o wartości przynajmniej 8 V. Zaś obiektem badanym jest pojemnościowy czujnik wilgotności względnej HS1101, którego pojemność zmienia się w zakresie 161 – 193 pF. Układ laboratoryjny posiada szerszy zakres badanych pojemności.

4.2 Inteligentny czujnik pojemnościowy

Głównym blokiem zarządzającym układem laboratoryjnym jest Arduino Micro (rys 4.2), jest on połączony z obwodem pomiarowym. Komunikacja z obwodem pomiarowym odbywa się poprzez uniwersalny interfejs czujnik-mikrokontroler dla mikrokontrolerów z modulem przechwytywania zdarzeń zewnętrznych. Stabilny i dokładny pomiar zapewnia wewnętrzny zasilacz stabilizowany. Aby dodatkowo ograniczyć pobierany prąd z wewnętrznego zasilacza, zdecydowano, że moduł Arduino Micro zostanie zasilony z zewnętrznego napięcia, jest to możliwe gdyż wspomniany moduł posiada wbudowany stabilizator monolityczny. Kolejnym blokiem inteligentnego czujnika pojemnościowego jest sensor temperatury i wilgotności względnej SHTC3. Implementacja tego bloku zapewniła dodatkowe funkcje tj. przybliżone sprawdzenie poprawności wyznaczonej wilgotności z czujnika pojemnościowego HS1101. Oba sensory RH zostały umiejscowione możliwie blisko siebie, aby podobnie reagowały na zmiany parametrów otoczenia. Dodatkowa informacja o temperaturze pozwala uzyskać informacje o punkcie rosy, czyli o temperaturze, w której rozpocznie się proces skraplania gazu, co znacząco może wpłynąć na wskazania czujnika pojemnościowego HS1101. Układ laboratoryjny dodatkowo został wyposażony w układ prezentacji danych, czyli wyświetlacz alfanumeryczny LCD. Obecność tego bloku nie jest wymagana do poprawnego działania układu laboratoryjnego.



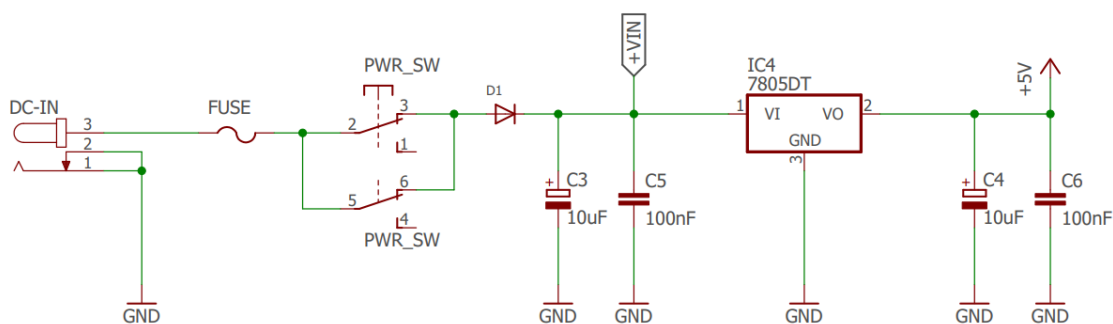
Rys 4.2. Schemat blokowy układu laboratoryjnego.

4.3 Układ zasilania

Stabilność napięcia zasilającego z punktu widzenia układu pomiarowego jest jednym z najważniejszych elementów niniejszej realizacji sprzętowej. Napięcie to wpływa na poziom napięcia wyjściowego z bufora trójstanowego, który stanowi sygnał wejściowy dla bloku pomiarowego. Stabilność napięcia w czasie pomiaru jest nieodzowna dla zapewnienia wysokiej dokładności pomiarowej, gdyż jednym z parametrów w formule (TU WZÓR) jest właśnie napięcie sygnału taktującego blok pomiarowy. Parametr ten wyklucza użycie zasilania z portu USB, ze względu na niestabilność napięcia, która może wahać się od 4,5 do 5,5 V.

Zastosowany w projekcie stabilizator monolityczny 7805 (rys 4.3) posiada parametry wystarczające do zapewnienia należytej stabilności napięcia w układzie pomiarowym. Współczynnik temperaturowy napięcia wyjściowego wynosi zaledwie $-1,1 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$. Czas pomiaru pojemności jest wielokrotnie mniejszy od bezwładności temperaturowej otoczenia, dlatego nie wpłynie to na stabilizowane napięcie. Kolejnym parametrem jest regulacja napięcia w stosunku do zmian pobieranego prądu, który został przedstawiony w wielkości typowej 5 mV/A . W trakcie pomiaru jedyna zmienność prądu będzie wynikała z ładowania i rozładowania pojemności badanej, pozostałe układy jak SHTC3 oraz LCD w tym czasie pozostają w spoczynku. Poziom wahań prądu jest zależny od rezystancji pomiarowej, która to powinna znajdować się w zakresie od $100 \text{ k}\Omega$ do $1 \text{ M}\Omega$, zatem nawet w trakcie pełnego rozładowania pojemności prąd ten będzie znacząco ograniczony, nie wpływając tym samym na stabilizowane napięcie.

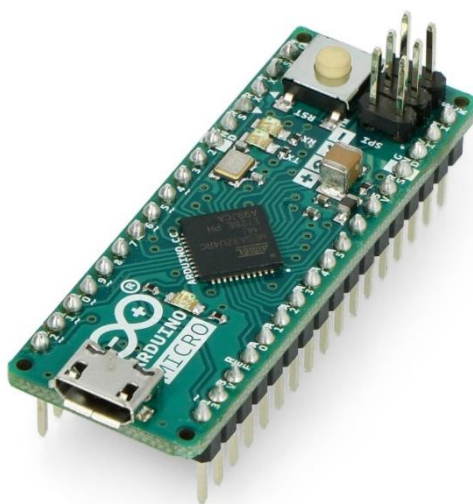
Układ zasilania został wyposażony w diodę prostowniczą, zabezpieczającą układ laboratoryjny przed podłączeniem zewnętrznego napięcia zasilającego o odwrotnej polaryzacji. Stabilizator napięcia do poprawnej pracy potrzebuje nadwyżkę 2 V zewnętrznego napięcia zasilania w stosunku do napięcia stabilizowanego, wliczając w to potencjał odkładający się na diodzie prostowniczej, układ laboratoryjny należy zasilać napięciem minimalnym 8 V .



Rys 4.3. Schemat ideowy układu zasilającego.

4.4 Moduł Arduino Micro

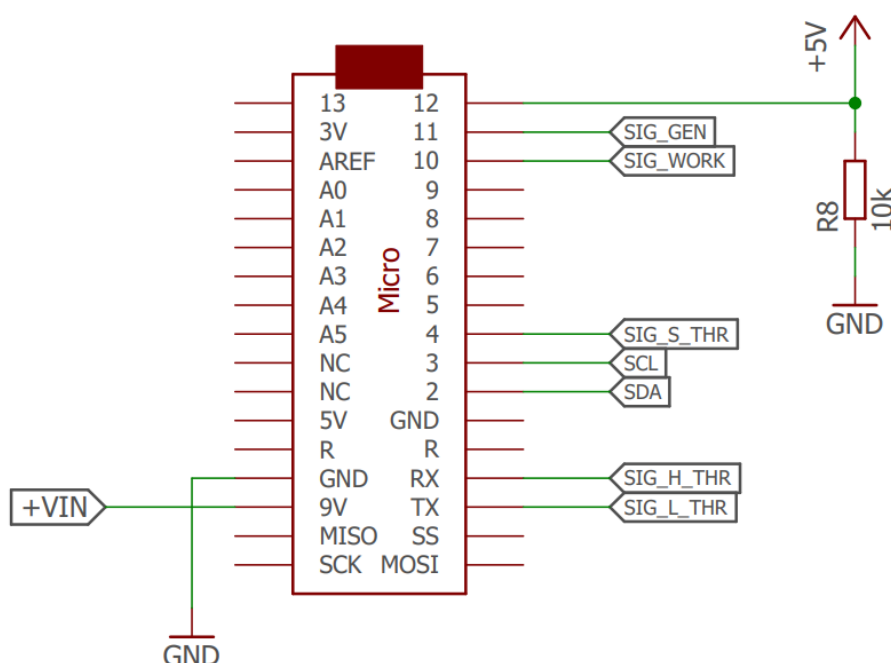
Wykorzystany moduł Arduino Micro (rys 4.4) oparty jest o 8 bitowy mikrokontroler ATmega32U4 posiada wbudowane złącze Micro USB oraz rezonator kwarcowy o częstotliwości 16 MHz. Na płytce PCB znajduje się także złącze do programowania szeregowego ISP, oraz 3 diody elektroluminescencyjne, które w projekcie sygnalizują wykonanie instrukcji przez układ laboratoryjny, podłączenie do komputera nadrzędnego, a także skomunikowanie z interfejsem użytkownika. Moduł posiada listwy kołkowe z wyprowadzeniami mikrokontrolera po obu stronach PCB. W projekcie został zrealizowany jako nakładka, możliwa do odłączenia. Moduł wyposażony został w stabilizator napięcia zasilania, o niewielkim poborze mocy. Mikrokontroler, przy zegarze 16 MHz, wymaga zasilania o wartości 5 V, wewnątrz modułu znajduje się także drugi stabilizator monolityczny o napięciu wyjściowym 3,3 V.



Rys 4.4. Moduł Arduino Micro.

Podłączenie bloku Arduino Micro (rys 4.5) odbywa się z wykorzystaniem interfejsu TWI (SDA, SCL) z modułami wyświetlacza alfanumerycznego LCD oraz z czujnikiem temperatury i wilgotności względnej SHTC3. Magistralowa topologia pozwala na łatwą konfigurację i przyspiesza rozbudowę układu. Sygnały wyjściowe, sterujące obwodem pomiarowym, to m. in. sygnał aktywacji buforów trójstanowych (SIG_WORK) oraz sygnał taktujący człon pomiarowy RC (SIG_GEN). Pozostałe sygnały tj. przekroczenie progów napięć przez zgromadzony ładunek pojemności badanej (SIG_L_THR, SIG_H_THR) oraz suma tych zdarzeń (SIG_S_THR), poprzez bufor trójstanowy, są podłączone do wejść mikrokontrolera. Tak jak wspomniano, wykorzystano wewnętrzny stabilizator modułu do zasilania mikrokontrolera, w celu obniżenia poboru prądu ze stabilizatora 7805 zasilającego pozostałe bloki układu laboratoryjnego, w tym celu napięcie zewnętrzne (VIN) zostało podłączone do dedykowanego wejścia.

Dodatkowo, aby programowo sprawdzić obecność zewnętrznego napięcia zasilania, zastosowano rezystor R8. Podczas podłączenia Arduino Micro do portu USB, czerpie on z niego zasilanie, natomiast brak napięcia zewnętrznego powoduje, że wejście 12 pozostaje niepodłączone (nie panuje na nim żadne napięcie), dlatego wejście to musi zostać podciągnięte do masy układu poprzez rezystor R8. Odczyt logicznego „0” z portu 12 informuje mikrokontroler o braku zewnętrznego napięcia zasilającego, generuje on wtedy stosowny komunikat do interfejsu użytkownika.

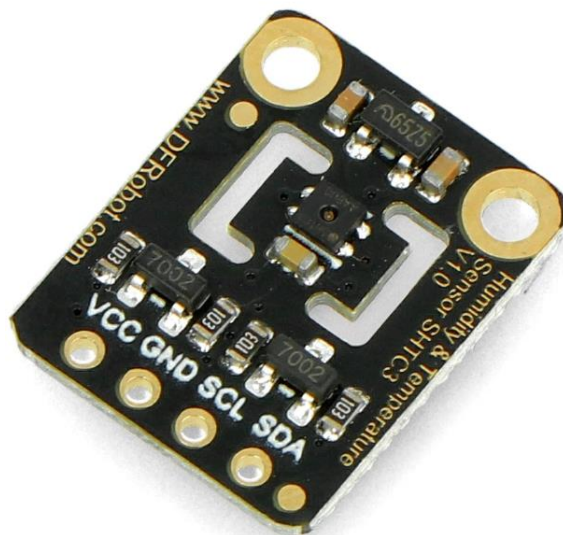


Rys 4.5. Schemat ideowy podłączenia modułu Arduino Micro.

4.5 Moduł SHTC3

Służący do pomiaru temperatury i wilgotności względnej, moduł SHTC3 został zaimplementowany w celu potwierdzenia poprawności wyznaczonej wartości wilgotności względnej uzyskanej w drodze pomiarów. Nie jest to jednak urządzenie na tyle dokładne aby kalibrować układ pomiarowy, ponieważ jego typowa dokładność dla wilgotności względnej wynosi $\pm 2\%$ RH. Dodatkowa funkcja pomiaru temperatury pozwala na uzyskanie informacji o temperaturze punktu rosy, która określa początek skraplania się gazu. Moment skroplenia się gazu może być istotny z punktu widzenia dokładności pomiarów, gdyż pomiar pojemności wilgotnego czujnika HS1101 może wprowadzać błąd. Układ laboratoryjny umożliwia śledzenie i wyciągnięcie wniosków z otrzymanych pomiarów. Pomiar temperatury i wilgotności zajmuje czujnikowi mniej niż 20 ms, co umożliwia każdorazowy pomiar tych parametrów nawet podczas wielokrotnych serii pomiarowych.

Moduł SHTC3 składa się z czujnika, pracującego na poziomach logicznych 3,3 V, na płycie PCB (rys 4.6) zaimplementowano zarówno konwertery stanów logicznych z 5 V na poziom 3,3 V oraz monolityczny stabilizator napięcia zasilający czujnik, umożliwia to bezpośrednie podłączenie modułu do układów pracujących w poziomie 5 V.



Rys 4.6. Moduł SHTC3.

4.6 Moduł LCD

Wykorzystanie wyświetlacza alfanumerycznego LCD (rys 4.7) ma na celu prezentację danych. Obecność wyświetlacza nie jest konieczna do prawidłowego działania układu. Wykorzystano sterowanie poprzez interfejs TWI, dzięki czemu mikrokontroler automatycznie wykrywa jego obecność podczas inicjalizacji systemu i analizuje w pętli głównej programu. Zastosowanie ekspandera wyjść PCF8574t znacząco ogranicza ilość wyprowadzeń, co jest zaletą, ponieważ ze względu na wymiary płytki PCB, zdecydowano żeby wyświetlacz był dołączany do układu laboratoryjnego za pomocą przewodów. Do tego celu potrzeba konkretnie 4 przewodów, z czego 2 służą jako zasilanie modułu oraz pozostałe 2 zapewniają komunikację z ekspanderem wyjść. Dedykowany ekspander do sterowania wyświetlaczami LCD posiada wbudowany potencjometr, służący do regulacji kontrastu. Interfejs TWI wymaga także rezystorów podciągających do zasilania, ponieważ wyjścia tego interfejsu występują w konfiguracji otwartego kolektora. W tym celu zaimplementowano w układzie laboratoryjnym rezystory R6 oraz R7, o wartości rezystancji 10 k Ω .

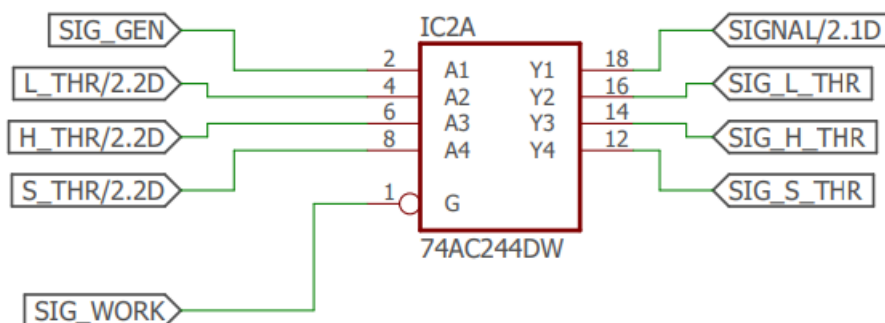
Po każdym pomiarze, interfejs użytkownika wysyła do układu laboratoryjnego obliczone wartości pojemności, wilgotności względnej i temperatury. Poza tym wysyłany jest średni czas ładowania i rozładowania badanej pojemności czujnika, ten parametr został udostępniony użytkownikowi tylko poprzez wyświetlacz LCD.



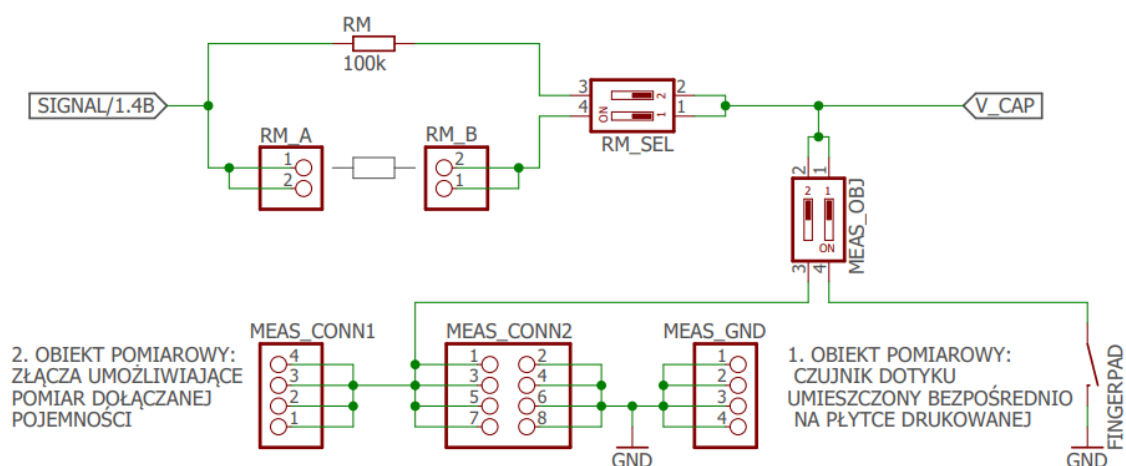
Rys 4.7. Moduł wyświetlacza alfanumerycznego LCD

4.7 Układ pomiarowy

Blok pomiarowy składa się z bufora trójstanowego, członu RC, toru przetwarzania sygnału pomiarowego oraz toru napięć referencyjnych. Jednym z ważniejszych, w tym zagadnieniu, parametrów są stabilne napięcia odniesienia, możliwie najniższe napięcie niezrównoważenia komparatorów oraz niewielki ich prąd polaryzacji obwodów wejściowych.

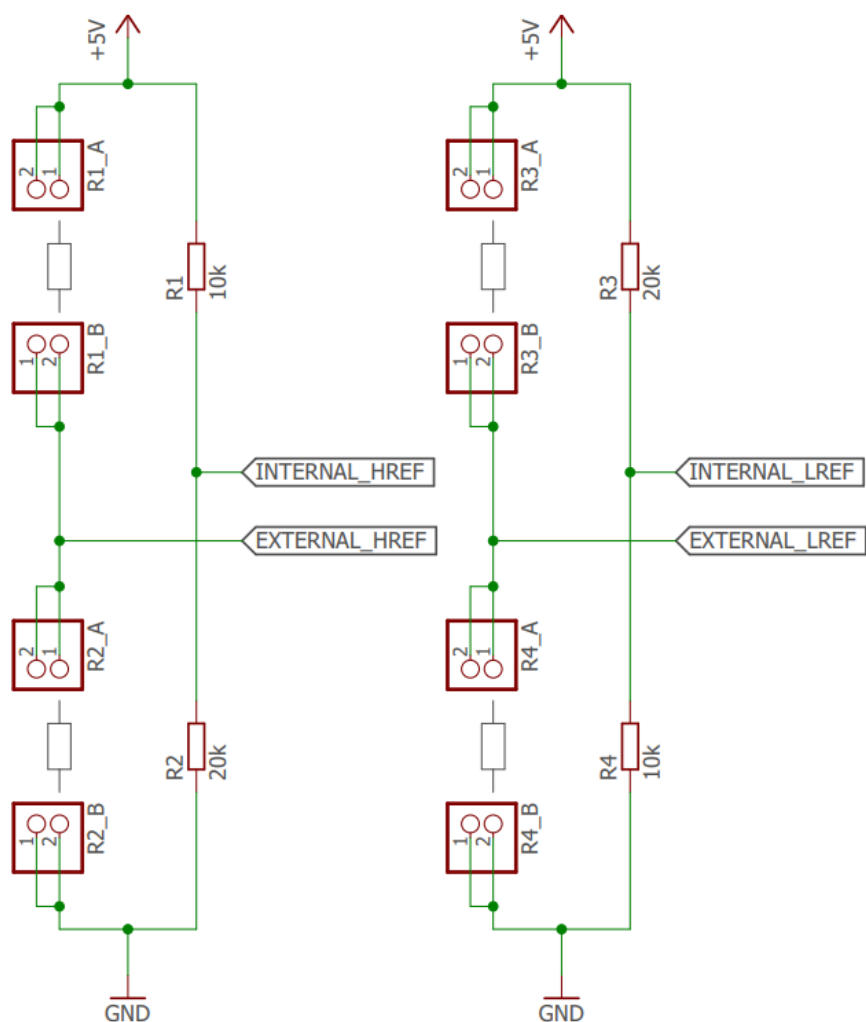


Rys 4.8. Schemat ideowy bufora trójstanowego.

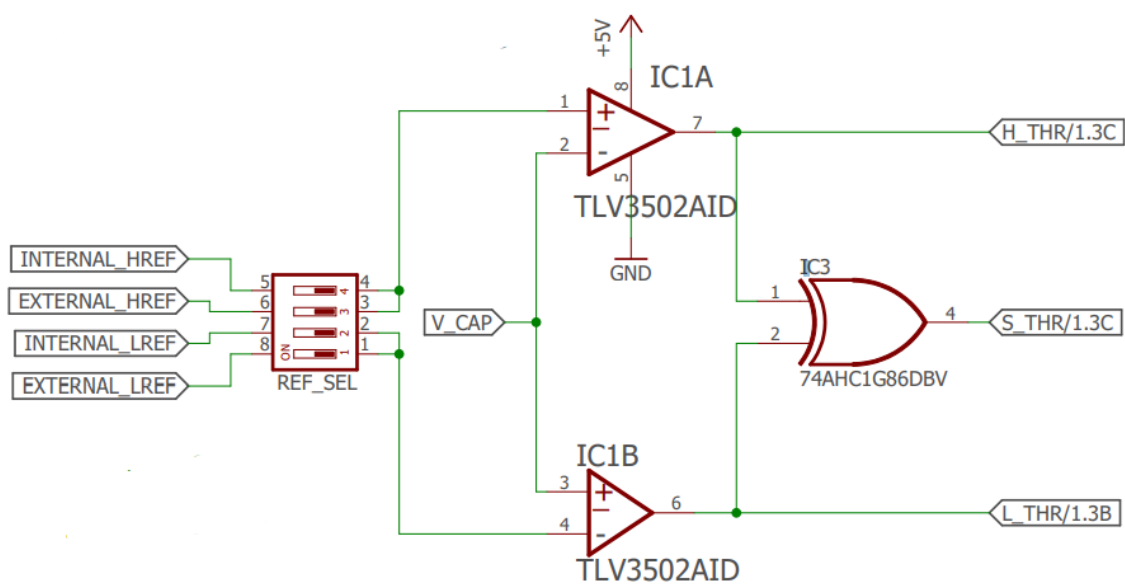


Rys. 4.9. Schemat ideowy członu pomiarowego RC.

Uzyskując stabilne napięcie zasilania możliwa jest konfiguracja napięć odniesienia za pomocą precyzyjnych dzielników rezystancyjnych (rys. 4.10). Zaimplementowano możliwość wyboru dzielników wbudowanych (R1, R2; R3, R4) oraz zewnętrznych, konfigurowanych przez użytkownika. Do konfiguracji służą żeńskie listwy kołkowe, w których użytkownik ma możliwość podłączenia dowolnego dzielnika. Zaś wbudowane zapewniają stosunek 2/3 napięcia zasilania (w przypadku górnego progu) oraz 1/3 napięcia zasilania (w przypadku dolnego progu). Zastosowanie rezystorów do realizacji potencjałów odniesienia niesie ze sobą zaletę, ponieważ wahania napięcia zasilającego mają wpływ na wyjście dzielnika, kompensując tym samym napięcie referencyjne. Na wspomnianych rezystorach wydzielą się niewielka moc, nie powodując zmian rezystancji ze względu na wydzielane ciepło. Wybór obsługiwanego potencjału odniesienia obsługiwany jest poprzez przełączniki DIPSWITCH.



Rys 4.10. Schemat ideowy toru napięć referencyjnych.

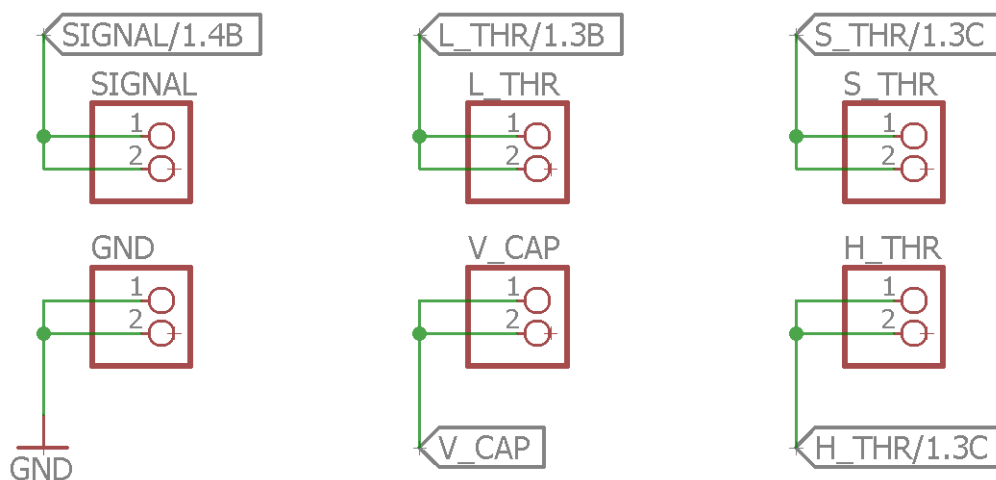


Rys 4.11. Schemat ideowy toru przetwarzania sygnału pomiarowego.

4.8 Złącza diagnostyczne

Diagnostyka sygnałów w układzie laboratoryjnym jest jedną z ważniejszych elementów dydaktycznych, pozwala użytkownikowi zapoznać się i zrozumieć metodykę pomiarową. W celu realizacji projektu zastosowano złącza diagnostyczne w postaci listew kołkowych, które umożliwiają podłączenie oscyloskopu. Każda sonda oscyloskopowa wnosi pewną, niewielką pojemność do układu, więc samo podłączenie sondy wywoła zmianę badanej pojemności. Aby zminimalizować wpływ sondy należy przestawić ją w tryb pracy „x10”, wykazuje ona w tym trybie mniejszą pojemność.

Złącza diagnostyczne umożliwiają podejrzenie charakterystyki przejściowej sygnału ładowania i rozładowania pojemności. Podgląd przebiegu w tym punkcie najbardziej narażony jest na działanie pojemności pasożytniczej sondy pomiarowej. Wyprowadzony został również sygnał taktowania bloku pomiarowego. Podczas kalibracji urządzenia, mikrokontroler wystawia sygnał prostokątny o częstotliwości 1 MHz, na tym wyprowadzeniu, umożliwia to doświadczalne sprawdzenie opóźnień działania komparatora oraz poziomy napięć wyjściowych bufora trójszanowego. Wyprowadzone zostały również sygnały osiągnięcia progu (L_THR – osiągnięty dolny próg, H_THR – osiągnięty górny próg), a także suma powyższych zdarzeń (S_THR). Dzięki tym sygnałom możliwe jest stwierdzenie, przy jakim poziomie napięcia na pojemności zareaguje komparator.



Rys 4.12. Schemat ideowy złączy diagnostycznych.

4.9 Layout PCB

4.9.1 Projekt

4.9.2 Realizacja

5 UŻYTE UKŁADY PERYFERYJNE MIKROKONTROLERA

W rozdziale zostanie zaprezentowana struktura wewnętrzna mikrokontrolera ATmega32U4. Szczególną uwagę skupiono na objaśnieniu konfiguracji układów peryferyjnych, wraz z omówieniem rejestrów pracy, a także na zaletach wykorzystania interfejsu TWI.

5.1 System przerwań

System przerwań jest jeden z ważniejszych układów peryferyjnych mikrokontrolerów, pozwala przerwać aktualnie wykonujący się ciąg instrukcji programu głównego, na skutek wystąpienia określonego zdarzenia. Pozwala to na możliwie szybką reakcję i obsługę przerwania. Program obsługujący zdarzenie powinien składać się z niewielkiej liczby instrukcji, w ten sposób działanie programu głównego nie zostanie zaburzone.

Każde, uprzednio zaprogramowane, wystąpienie zdarzenia od układu peryferyjnego objawia się ustawieniem bitu żądania obsługi. W pierwszej kolejności zostają obsłużone przerwania o najwyższym priorytecie. System obsługuje również zagnieżdżanie przerwań, wybierając w danej chwili, które zdarzenie potrzebuje natychmiastowej reakcji. Dokumentacja mikrokontrolera określa, że czas pomiędzy wystąpieniem zdarzenia a jego obsługą wynosi minimum 5 cykli zegara taktującego. W tym czasie następuje zapisanie w pamięci stosu aktualnej wartości licznika programu, którego wartość w następnym kroku zostaje ustawiona na przypisaną dla danego przerwania, czyli domyślny wskaźnik na tablicę przerwań. Po zakończeniu przerwania w sposób analogiczny licznik programu zostaje załadowany wartością z pamięci stosu, następnie zerowana jest flaga żądania obsługi przerwania. Cała procedura powrotu do wcześniej wykonywanego programu ponownie zajmuje minimum 5 cykli zegarowych.

Przy chęci wykorzystania systemu przerwań konieczne jest zaprogramowanie rejestru statusowego mikrokontrolera (rys 5.1). Bit 7 (I – Global Interrupt Enable) jest globalnym włącznikiem, przerwania zostają obsługiwane dopiero w momencie ustawienia tego bitu na logiczną wartość „1”. Dodatkowo każdy układ peryferyjny posiada maski przerwań, które uprzednio należy zaprogramować, wybierając dozwolone źródło przerwania.

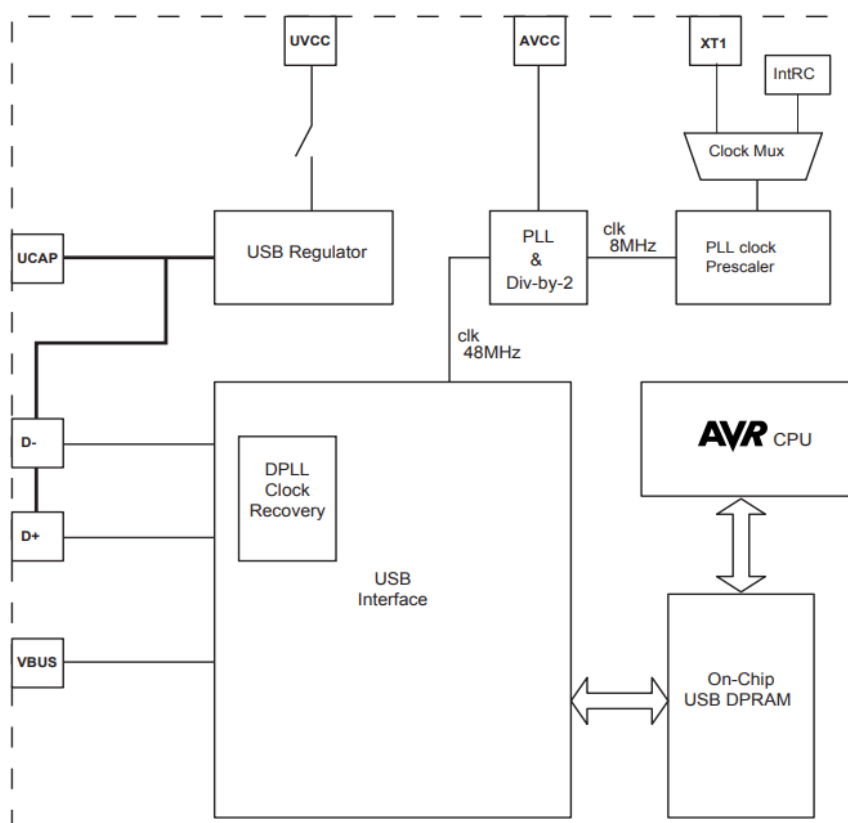
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	I	T	H	S	V	N	Z	C	SREG
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Rys 5.1. Rejestr statusowy mikrokontrolera ATmega32U4

5.2 USB – Universal Serial Bus

Do obsługi interfejsu USB wbudowanego w mikrokontroler, podczas realizacji projektu dyplomowego posłużono się dedykowaną biblioteką LUFA USB, rekomendowaną przez firmę Microchip. Jednakże, aby zapoznać się z mechanizmami funkcjonowania interfejsu, konieczne jest pogłębienie informacji z dokumentacji mikrokontrolera. Wspomniana biblioteka pozwala na konfigurację deskryptorów oraz identyfikatora, co umożliwiło zaimplementowanie automatycznej detekcji układu laboratoryjnego podłączonego do komputera, w interfejsie użytkownika.

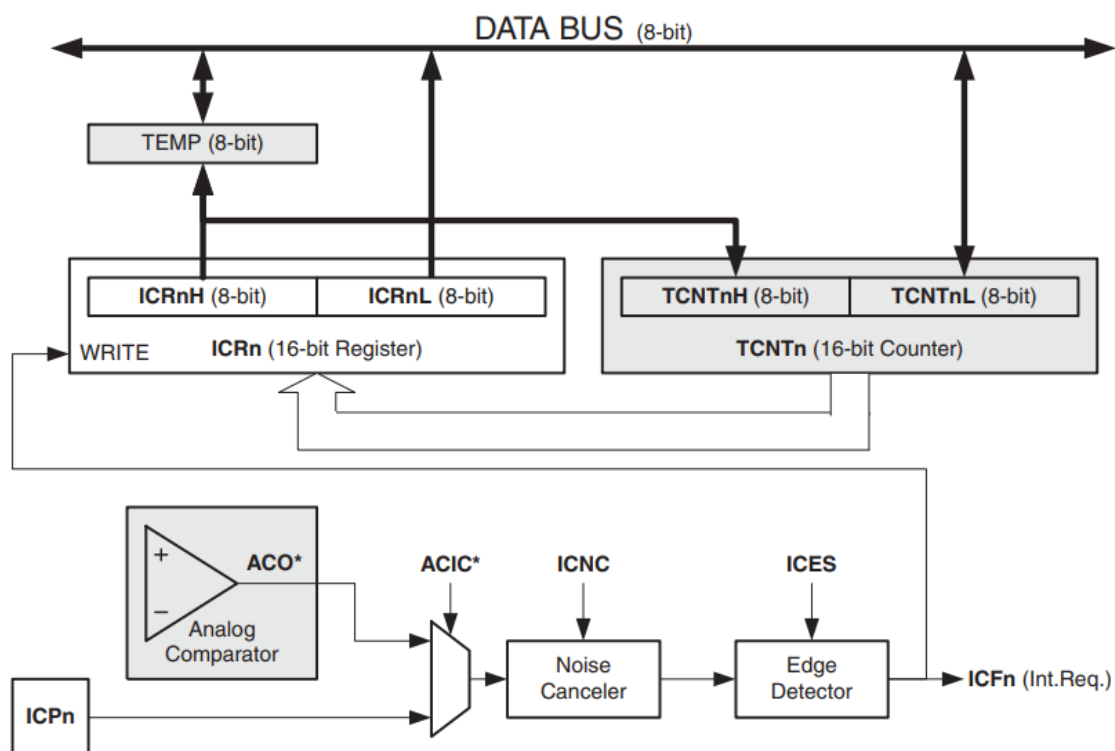
Interfejs USB umożliwia obsługę zdarzenia podłączenia do komputera, a także nawiązania połączenia z aplikacją. Moment, w którym mikrokontroler wykryje pojawienie się napięcia zasilania na dedykowanym wyprowadzeniu VBUS, równoważne jest podłączeniu do portu USB komputera, wywoływane jest przerwanie. System przerwań jest konieczny do poprawnego działania kontrolera USB. Natomiast połączenie aplikacji z mikrokontrolerem odbywa się poprzez przesłanie protokołu, po którym również generowane jest przerwanie. Praca mikrokontrolera z maksymalną prędkością, przy częstotliwości zegara 16 MHz, możliwa jest tylko przy zasilaniu napięciem 5V, dlatego w strukturze wewnętrznej zaimplementowano regulatory napięcia (rys 5.2), dostosowujące wyprowadzenia danych do standardu USB (3 – 3.6 [V]).



Rys 5.2. Diagram kontrolera USB

5.3 ICP – Input Capture

Do realizacji projektu wykorzystano 16 bitowy licznik Timer/Counter1, z wyłączonym dzielnikiem częstotliwości sygnału taktującego, aby zmaksymalizować rozdzielczość pomiaru czasu. Takowy licznik posiada możliwość pracy w trybie przechwytywania zdarzeń zewnętrznych. Realizuje on funkcję zliczania impulsów sygnału taktującego, wysyłając sygnał przerwania po wykryciu zaprogramowanego zbocza na dedykowanym wyprowadzeniu mikrokontrolera i zapamiętując aktualny stan licznika w osobnym rejestrze (rys 5.3). Układ peryferyjny został wyposażony w filtr szumów, tłumiący krótsze impulsy od 4 cykli zegarowych, w rezultacie filtr ten wprowadza opóźnienie czasowe, 4 cykli zegarowych, dla sygnału podawanego na detektor zbocza. Odmierzanie cykli czasowych pomiędzy wystąpieniem kolejnych zdarzeń zostało obsłużone z wykorzystaniem systemu przerwań.



Rys 5.3. Schemat blokowy układu licznika w trybie przechwytywania zdarzeń.

Licznik pracuje w trybie normalnym, zliczając impulsy zegarowe od wartości 0 do 65535, czas w którym licznik zliczy pełen zakres impulsów wynosi 4,096 ms z wyłączonym dzielnikiem częstotliwości zegara taktującego licznik. Natomiast maksymalny szacowany czas ładowania i rozładowania pojemności z zadanego zakresu 100 – 300 pF został określony w rozdziale 3 na około 200 μ s. Dodatkowym zaimplementowanym zabiegiem zwiększającym dokładność pomiaru jest nad próbkowanie i decymacja, która pozwala zwiększyć rozdzielczość pomiaru czasu.

Konfiguracja licznika (rys 5.4) opiera się na zaprogramowaniu obecności filtra szumów w układzie, odpowiedzialny za to jest bit 7 w rejestrze TCCR1B (ICNC1 – Input Capture Noise Canceler). Tryb normalnego zliczania jest domyślnie ustawiony po sygnale zerowania. Uruchomienie licznika odbywa się poprzez wybór sygnału zegarowego (CS12:10), maksymalną prędkość zliczania uzyskuje się dla wyłączanego dzielnika częstotliwości (CS12 = „0”; CS11 = „0”; CS10 = „1”). Za wybór detekcji zbocza decyduje stan bitu 6 w rejestrze TCCR1B (ICES1 – Input Capture Edge Select), wartość logiczna „1” oznacza zbocze narastające, natomiast logiczne „0” – opadające.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	ICNC1	ICES1	–	WGM13	WGM12	CS12	CS11	CS10	TCCR1B
Read/Write	R/W	R/W	R	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Rys 5.4. Rejestr konfiguracyjny licznika 1

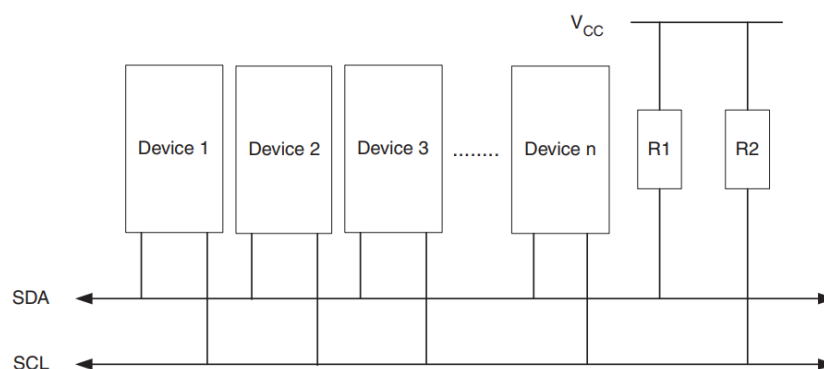
Zezwolenie na przerwanie od układu przechwytywania zdarzeń dla licznika 1 opisuje bit 5 (ICIE1 – Input Capture Interrupt Enable) w rejestrze TIMSK1 (rys 5.5). Chcąc uaktywnić przerwanie, należy ustawić powyżej wspomniany bit rejestru na wartość logiczną „1”.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	–	–	ICIE1	–	OCIE1C	OCIE1B	OCIE1A	TOIE1	TIMSK1
Read/Write	R	R	R/W	R	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Rys 5.5. Rejestr masek przerw licznika 1

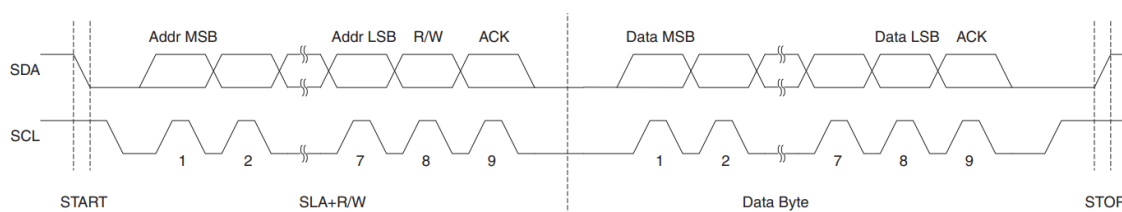
5.4 TWI – Two Wire Interface

Komunikacja z układami zewnętrznymi tj. wyświetlacz LCD z ekspanderem wyprowadzeń PCF8574t oraz czujnik temperatury i wilgotności względnej SHTC3, odbywa się poprzez szeregowy, synchroniczny interfejs TWI. Zaletą tego interfejsu jest jawne potwierdzenie odbioru danych przez układ podrzędny, wykorzystujący operację logiczną AND na drucie. W momencie wystąpienia dziewiątego bitu transmisji danych z układu master do slave, urządzenie podrzędne zwraca linię danych na czas jednego cyklu zegarowego sygnału taktującego transmisję. Mechanizm ten został wykorzystany do wykrycia obecności układów podrzędnych w urządzeniu laboratoryjnym, dzięki czemu brak lub odłączenie jednego z układów nie zaburza działania programu głównego mikrokontrolera. Operacja logiczna AND na drucie jest możliwa poprzez zastosowanie wyprowadzeń linii danych (SDA) i zegara (SCL) w konfiguracji otwartego kolektora. Stan logicznego „1” wymuszany jest poprzez rezystory podciągające R1 i R2 (rys 5.6), do napięcia zasilającego. Oznacza to, że w stanie beczynności linie danych i zegara są w stanie logicznej „1”. Zastosowanie wyprowadzeń z otwartym kolektorem umożliwia także detekcję arbitrażu danych na liniach danych i zegara, co pozwala na pracę interfejsu w konfiguracji z wieloma urządzeniami nadrzędnymi.



Rys 5.6. Sposób podłączenia urządzeń w interfejsie TWI.

Transmisja danych poprzedzona jest sygnałem startu (rys 5.7), w następnej kolejności wysyłany jest adres urządzenia podrzędnego. Układ nadrzędny odpowiedzialny jest za wysyłanie sygnału zegarowego w całym cyklu transmisyjnym, oraz za wywołanie układu do komunikacji, poprzez transmisję adresu urządzenia, również w przypadku odbioru danych.



Rys 5.7. Typowa transmisja danych interfejsu TWI.

Po każdej paczce bajtowych danych występuje bit potwierdzenia odbioru, wystawiany przez obecnie odbierające urządzenie. Zakończenie transmisji sygnalizowane jest przez układ nadrzędny, poprzez wywołanie sygnału stop. Elementy transmisji wywoływane są poprzez ustawienie poszczególnych bitów w rejestrze kontrolnym interfejsu TWI (rys 5.8). Warunek startu transmisji odbywa się poprzez ustawienie wartości logicznej „1” bitu TWSTA, natomiast warunek stopu analogicznie dla bitu TWSTO. Zakończenie etapów transmisji sygnalizowane jest poprzez automatyczne zerowanie bitu TWINT, oznaczającego flagę przerwania. Transmisja danych odbywa się poprzez uprzednio załadowany rejestr danych TWDR oraz uruchomienie modułu TWI. Natomiast odbiór danych jest dodatkowo sparametryzowany poprzez możliwość zaprogramowania znaku potwierdzenia przez układ nadrzędny. Stan potwierdzenia sygnalizowany jest uprzednio zaprogramowanym bitem TWEA (TWI Enable Acknowledge). Po każdym etapie transmisji aktualizowany jest status interfejsu w rejestrze TWSR, informujący o wystąpieniu błędów arbitrażu czy braku potwierdzenia od urządzenia podrzędnego.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	TWINT	TWEA	TWSTA	TWSTO	TWWC	TWEN	-	TWIE	TWCR
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R	R/W	R	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Rys 5.8. Rejestr kontrolny interfejsu TWI.

6 OPROGRAMOWANIE MIKROKONTROLERA

6.1 *Struktura programu*

6.2 *Inicjalizacja urządzenia*

6.3 *Pętla główna programu*

6.4 *Funkcje urządzenia*

6.4.1 *Kalibracja*

6.4.2 *Pomiar temperatury i wilgotności względnej*

7 INTERFEJS UŻYTKOWNIKA NA KOMPUTERZE PC

7.1 Strona startowa

7.2 Ustawienia ogólne

7.2.1 Eksport wyników pomiarowych do programu Matlab

7.2.2 Eksport dziennika zdarzeń

7.3 Kalibracja

7.4 Funkcje pomiarowe

7.5 Charakterystyki pomiarów

7.6 Dziennik zdarzeń

8 WERYFIKACJA EKSPERYMENTALNA

8.1 Stanowisko pomiarowe

8.2 Pomiar pojemności wzorcowych

8.3 Korekcja pomiarów

8.3.1 Algorytm regresji liniowej

8.3.2 Algorytm interpolacji Lagrange'a

9 PODSUMOWANIE

WYKAZ LITERATURY

- [1] Z. Czaja - A measurement method for capacitive sensors based on a versatile direct sensor-to-microcontroller interface circuit (2020).
- [2] Z. Czaja - A measurement method for lossy capacitive relative humidity sensors based on a direct sensor-to-microcontroller interface circuit (2021).
- [3] Z. Czaja - Measurement method for capacitive sensors for microcontrollers based on a phase shifter (2022).
- [4] Y. Meng, R. N. Dean - A Technique for Improving the Linear Operating Range for a Relative Phase Delay Capacitive Sensor Interface Circuit (2016).
- [5] Y. Meng, R. N. Dean, M. L. Adams - Improving the phase delay capacitive interface circuit technique using MOSFET switches (2019).
- [6] A. Skiba, H. Tiliouine – Stany nieustalone w obwodach elektrycznych. Przykłady i zadania. Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2022.
- [7] M. Kardaś – Mikrokontrolery AVR. Język C. Podstawy programowania. Wyd. ATNEL, Szczecin 2011.
- [8] R. Baranowski – Mikrokontrolery AVR ATmega w praktyce. Wyd. BTC, Warszawa 2005.
- [9] C. Sells – Windows Forms Programming in C#. Pub. Addison-Wesley Professional, 2003.
- [10] Dokumentacja mikrokontrolera ATmega32U4 (data dostępu:)
https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-7766-8-bit-avr-atmega16u4-32u4_datasheet.pdf
- [11] Spis instrukcji mikrokontrolera ATmega32U4 (data dostępu:)
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-0856-avr-instruction-set-manual.pdf>
- [12] Dokumentacja modułu Arduino Micro (data dostępu:)
<https://docs.arduino.cc/hardware/micro>
- [13] Dokumentacja modułu SHTC3 (data dostępu:)
https://sensirion.com/media/documents/643F9C8E/6164081E/Sensirion_Humidity_Sensors_SHTC3_Datasheet.pdf
- [14] Dokumentacja czujnika wilgotności HS1101 (data dostępu:)
<https://www.jameco.com/Jameco/Products/ProdDS/2082901.pdf>
- [15] Dokumentacja sterownika wyświetlaczy LCD, HD44780 (data dostępu:)
<https://www.sparkfun.com/datasheets/LCD/HD44780.pdf>
- [16] Dokumentacja układu komparatora TLV3502AID (data dostępu:)
<https://www.ti.com/lit/ds/sbos507a/sbos507a.pdf>
- [17] Dokumentacja bufora trójstanowego, 74AHC244 (data dostępu:)
<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn54ahc244-sp.pdf>
- [18] Dokumentacja biblioteki LUFA USB (wersja oprogramowania: 210130)
<http://www.fourwalledcubicle.com/LUFA.php>

WYKAZ RYSUNKÓW

Rys 3.1. Obwód pomiarowy.	11
Rys 3.2. Analiza operatorowa obwodu pomiarowego.	12
Rys 3.3. Przekształcony obwód pomiarowy w dziedzinie operatorowej.	12
Rys 3.4. Schemat bloku pomiarowego – symulacja.	13
Rys 3.5. Schemat bloku porównywania napięć progowych – symulacja.	14
Rys 3.6. Schemat bufora trójstanowego – symulacja.	15
Rys 3.7. Schemat podłączenia mikrokontrolera – symulacja.	16
Rys 4.1. Schemat ideowy układu zasilającego.	20
Rys 4.2. Moduł Arduino Micro.	21
Rys 4.3. Schemat ideowy złącz diagnostycznych.	27
Rys 5.1. Rejestr statusowy mikrokontrolera ATmega32U4	29
Rys 5.2. Diagram kontrolera USB	30
Rys 5.3. Schemat blokowy układu licznika w trybie przechwytywania zdarzeń.	31
Rys 5.4. Rejestr konfiguracyjny licznika 1	32
Rys 5.5. Rejestr masek przerw licznika 1	32
Rys 5.6. Sposób podłączenia urządzeń w interfejsie TWI.	33
Rys 5.7. Typowa transmisja danych interfejsu TWI.	33
Rys 5.8. Rejestr kontrolny interfejsu TWI.	33

WYKAZ TABEL

WYKAZ LISTINGÓW

DODATEK A – SCHEMAT IDEOWY UKŁADU POMIAROWEGO

DODATEK B – SCHEMAT MONTAŻOWY UKŁADU POMIAROWEGO