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 0,1 %, co odpowiada dokładności pomiaru 0,1 pF dla zakresu mierzonych wartości pomiędzy 160 pF a 200 pF, co z kolei odpowiada co najmniej 0,3125 % 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 inżynieryjne 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 input event capture module. 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 0,1 %, which corresponds to the measurement accuracy of 0,1 pF for the range   
of measured values ​​between 160 pF and 200 pF, which in turn corresponds to at least   
0,3125 % 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

Spis treści

[1 Wstęp i cel pracy 7](#_Toc119514423)

[2 Przegląd metod pomiarowych 8](#_Toc119514424)

[2.1 Metoda oparta na przesuwniku fazowym 8](#_Toc119514425)

[2.2 Metoda pobudzenia sygnałem prostokątnym 9](#_Toc119514426)

[2.3 Metoda pomiaru ładowania/rozładowania RC 10](#_Toc119514427)

[2.4 Wybór metody pomiarowej 11](#_Toc119514428)

[3 Badania symulacyjne 13](#_Toc119514429)

[3.1 Analiza operatorowa obwodu 13](#_Toc119514430)

[3.2 Symulacja SPICE 15](#_Toc119514431)

[3.2.1 Podbloki układu 15](#_Toc119514432)

[3.2.2 Wyniki 18](#_Toc119514433)

[4 Budowa układu laboratoryjnego 22](#_Toc119514434)

[4.1 Stanowisko laboratoryjne 22](#_Toc119514435)

[4.2 Inteligentny czujnik pojemnościowy 23](#_Toc119514436)

[4.3 Układ zasilania 24](#_Toc119514437)

[4.4 Moduł Arduino Micro 25](#_Toc119514438)

[4.5 Moduł SHTC3 26](#_Toc119514439)

[4.6 Moduł LCD 27](#_Toc119514440)

[4.7 Układ pomiarowy 28](#_Toc119514441)

[4.8 Złącza diagnostyczne 31](#_Toc119514442)

[4.9 Layout PCB 32](#_Toc119514443)

[4.9.1 Projekt 32](#_Toc119514444)

[4.9.2 Realizacja 34](#_Toc119514445)

[5 Użyte Układy peryferyjne mikrokontrolera 35](#_Toc119514446)

[5.1 System przerwań 35](#_Toc119514447)

[5.2 USB – Universal Serial Bus 36](#_Toc119514448)

[5.3 ICP – Input Capture 37](#_Toc119514449)

[5.4 TWI – Two Wire Interface 38](#_Toc119514450)

[6 Oprogramowanie mikrokontrolera 40](#_Toc119514451)

[6.1 Struktura programu 40](#_Toc119514452)

[6.2 Inicjalizacja urządzenia 40](#_Toc119514453)

[6.3 Pętla główna programu 41](#_Toc119514454)

[6.4 Funkcje urządzenia 43](#_Toc119514455)

[6.4.1 Kalibracja 43](#_Toc119514456)

[6.4.2 Pomiar temperatury i wilgotności względnej 44](#_Toc119514457)

[6.4.3 Pomiar pojemności 45](#_Toc119514458)

[7 Interfejs użytkownika na komputerze PC 48](#_Toc119514459)

[7.1 Strona startowa 48](#_Toc119514460)

[7.2 Ustawienia ogólne 49](#_Toc119514461)

[7.2.1 Eksport wyników pomiarowych do programu Matlab 50](#_Toc119514462)

[7.2.2 Eksport dziennika zdarzeń 51](#_Toc119514463)

[7.3 Kalibracja 51](#_Toc119514464)

[7.4 Funkcje pomiarowe 52](#_Toc119514465)

[7.5 Charakterystyki pomiarów 55](#_Toc119514466)

[7.6 Dziennik zdarzeń 56](#_Toc119514467)

[8 Weryfikacja eksperymentalna 58](#_Toc119514468)

[8.1 Stanowisko pomiarowe 58](#_Toc119514469)

[8.2 Pomiar pojemności wzorcowych 60](#_Toc119514470)

[8.3 Korekcja pomiarów 65](#_Toc119514471)

[8.3.1 Algorytm regresji liniowej 65](#_Toc119514472)

[8.3.2 Algorytm interpolacji Lagrange’a 67](#_Toc119514473)

[9 Podsumowanie 72](#_Toc119514474)

[Wykaz literatury 73](#_Toc119514475)

[Wykaz rysunków 74](#_Toc119514476)

[Wykaz tabel 76](#_Toc119514477)

[Wykaz listingów 77](#_Toc119514478)

[DODATEK A – SYMULACJA LTSPICE 78](#_Toc119514479)

[DODATEK B – SCHEMAT IDEOWY 80](#_Toc119514480)

[DODATEK C – SCHEMAT MONTAŻOWY 82](#_Toc119514481)

# WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW I OZNACZEŃ

CMOS – (*ang. Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*) technologia wykonywania tranzystorów polowych

ICES1 – (*ang. Input Capture Edge Select*) wybór zbocza wyzwalającego moduł przechwytywania zdarzeń zewnętrznych

ICIE1 – (*ang. Input Capture Interrupt Enable*) zezwolenie na obsługę przerwań od modułu przechwytywania zdarzeń zewnętrznych

ICNC1 – (*ang. Input Capture Noise Canceler*) filtr szumów modułu przechwytywania zdarzeń zewnętrznych

ICP – (*ang. Input Capture*) moduł przechwytywania zdarzeń zewnętrznych

ISP – (*ang. In System Programming*) szeregowe programowanie mikrokontrolera

LCD – (*ang. Liquid Crystal Display*) wyświetlacz ciekłokrystaliczny

MCU – (*ang. Microcontroller Unit*) mikrokontroler

PC – (*ang. Personal Computer*) komputer osobisty

PCB – (*ang. Printed Circuit Board*) płytka z połączeniami elektrycznymi i punktami lutowniczymi

PLL – (*ang. Phase-Locked Loop*) układ powielania częstotliwości taktowania mikrokontrolera

PWM – (*ang. Phase-Width Modulation*) modulacja szerokości impulsu

SMD – (*ang. Surface-Mount Device*) element elektroniczny, montowany powierzchniowo

TWEA – (*ang. TWI Enable Acknowledge*) potwierdzenie odebrania danych w interfejsie TWI

TWI – (*ang. Two-Wire Interface*) dwuprzewodowy interfejs, do wymiany informacji   
z urządzeniami

TWINT – (*ang. TWI Interrupt*) flaga przerwania interfejsu TWI

TWSR – (*ang. TWI Status Register*) rejestr statusowy dwu-przewodowego interfejsu szeregowego

TWSTA – (*ang. TWI Start*) bit generujący warunek startu na magistrali TWI

TWSTO – (*ang. TWI Stop*) bit generujący warunek stopu na magistrali TWI

USB – (*ang. Universal Serial Bus*) uniwersalna magistrala szeregowa

XOR – (*ang. Exclusive Or*) bramka realizująca funkcję alternatywy rozłącznej

# Wstęp i cel pracy

Parametry środowiskowe, takie jak temperatura i wilgotność, są jednymi z głównych czynników wpływających na funkcjonowanie zakładów przemysłowych. Niejednokrotnie, podczas procesów wytwórczych, różnego rodzaju firm, niezbędnym jest spełnienie rygorystycznych wymagań jakościowych dla produkowanych wyrobów.

Podczas produkcji scalonych układów elektronicznych, parametry środowiskowe wpływają na reakcje zachodzące na strukturach krzemu. Monitorowanie i korygowanie czynników jest kluczowe dla zachowania znamionowych parametrów tych układów. Specjalistyczne urządzenia, wymagające niezawodnej i długotrwałej pracy, wymuszają dokładnej stabilizacji wilgotności względnej, temperatury oraz ciśnienia w środowisku wytwórczym. Podobnymi cechami charakteryzuje się sposób przechowania podzespołów, ponieważ zaniedbanie warunków środowiskowych może wpłynąć na korozję wyprowadzeń,  
czy zwiększyć prawdopodobieństwo wyładowań ESD i uszkodzenia struktury krzemowej. Systemy monitorujące parametry środowiskowe znalazły także zastosowanie przy produkcji żywności. Zapewnienie optymalnej temperatury i wilgotności pozwala np. na wysuszenie składników do wartości, nadającej się do dalszej obróbki. Natomiast, w gospodarstwach rolnych szczególną uwagę zwraca się na optymalną wilgotność gleby, wymaganą do poprawnego wzrostu roślin.

Środowisko monitorujące parametry składa się z serii czujników, dostarczających informacji o warunkach panujących w otoczeniu, w postaci elektrycznych sygnałów. Pomiar czynników w czasie rzeczywistym umożliwia reakcję podukładów systemu regulującego. Wiele zastosowań wymusza szybką odpowiedź sensora, na zmiany środowiskowe, oraz niezawodną pracę.

Niniejsza praca dyplomowa opierała się o zaprojektowanie i realizację rzeczywistego układu laboratoryjnego, umożliwiającego dokładną kalibrację sensora HS1101   
i monitorowanie wilgotności względnej w czasie rzeczywistym. Wspomniany czujnik charakteryzuje się zmianami pojemności struktury wewnętrznej, pod wpływem zmian wilgotności otoczenia. Zarządzanie układem pomiarowym, zostało zrealizowane za pomocą gotowego modułu Arduino Micro, opartego na 8-bitowym mikrokontrolerze z rodziny ATmega. Uniwersalny interfejs łączący sensor z układem zarządzającym, bazuje na module przechwytywania zdarzeń zewnętrznych. W ramach pracy powstała aplikacja na komputer   
PC, umożliwiająca sterowanie urządzeniem pomiarowym.

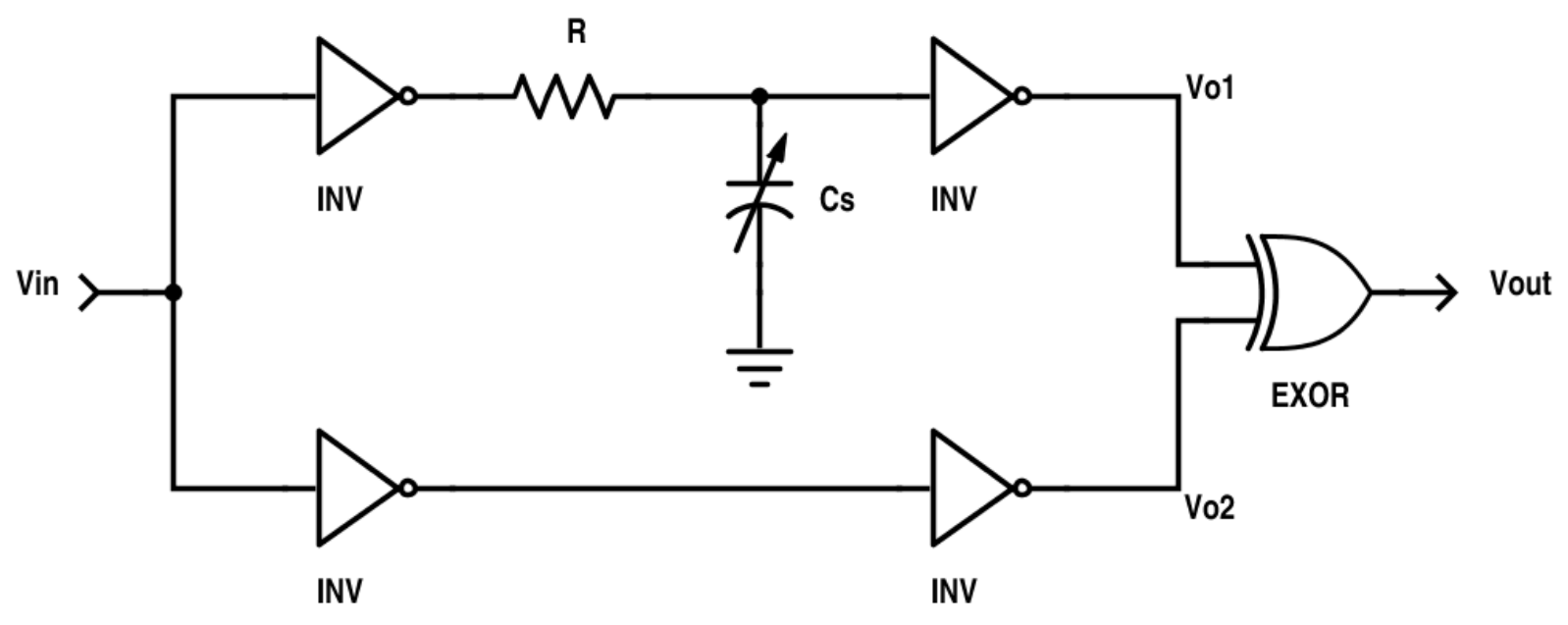
# Przegląd metod pomiarowych

W niniejszym rozdziale zostaną zaprezentowane metody pomiarowe, umożliwiające wyznaczenie pojemności rzędu pF. Omawiane implementacje bazują na uniwersalnym interfejsie czujnik-mikrokontroler. Szczególną uwagę zwrócono na wykorzystaną, w projekcie dyplomowym, metodę pomiarową. Zostaną omówione szczegółowe parametry każdej   
z implementacji.

## Metoda oparta na przesuwniku fazowym

Pomiar opóźnienia fazowego członu RC, ze znaną rezystancją umożliwia określenie wartości pojemności [4]. Sygnał taktujący układ pomiarowy, dodatkowo buforowany   
jest przez szereg bramek inwersyjnych. Ładowanie i rozładowanie pojemności badanej Cs   
(rys 2.1) wprowadza dodatkowe opóźnienie, podczas przełączenia stanów na Vo1. Stała częstotliwość sygnału sterującego pozwala na uzyskanie sygnału wyjściowego o charakterze PWM. Porównanie przebiegu wejściowego oraz opóźnionego odbywa się za pośrednictwem bramki XOR. Ważnym parametrem wpływającym na jakość sygnału są wprowadzone opóźnienia przez bramki inwersyjne wewnątrz układu pomiarowego, aby możliwie wykluczyć   
ich wpływ zastosowano także dodatkowe układy negujące, przez które przechodzi sygnał sterujący, do bloku porównania.

Częstotliwość sygnału taktującego jest kluczowa z punktu widzenia dokładności pomiarowej. Gdyż przekroczenie opóźnienia fazowego powyżej 45° wprowadza znaczący błąd. Wygenerowany sygnał PWM umożliwia konwersję do postaci analogowej, za pośrednictwem filtru dolnoprzepustowego. W takim przypadku wynikową wielkością fizyczną, niosącą informacje o wartości pojemności, byłoby analogowe napięcie, za których pomiar odpowiadałby moduł konwertujący napięci do postaci cyfrowej (ADC – Analog to Digital Converter).

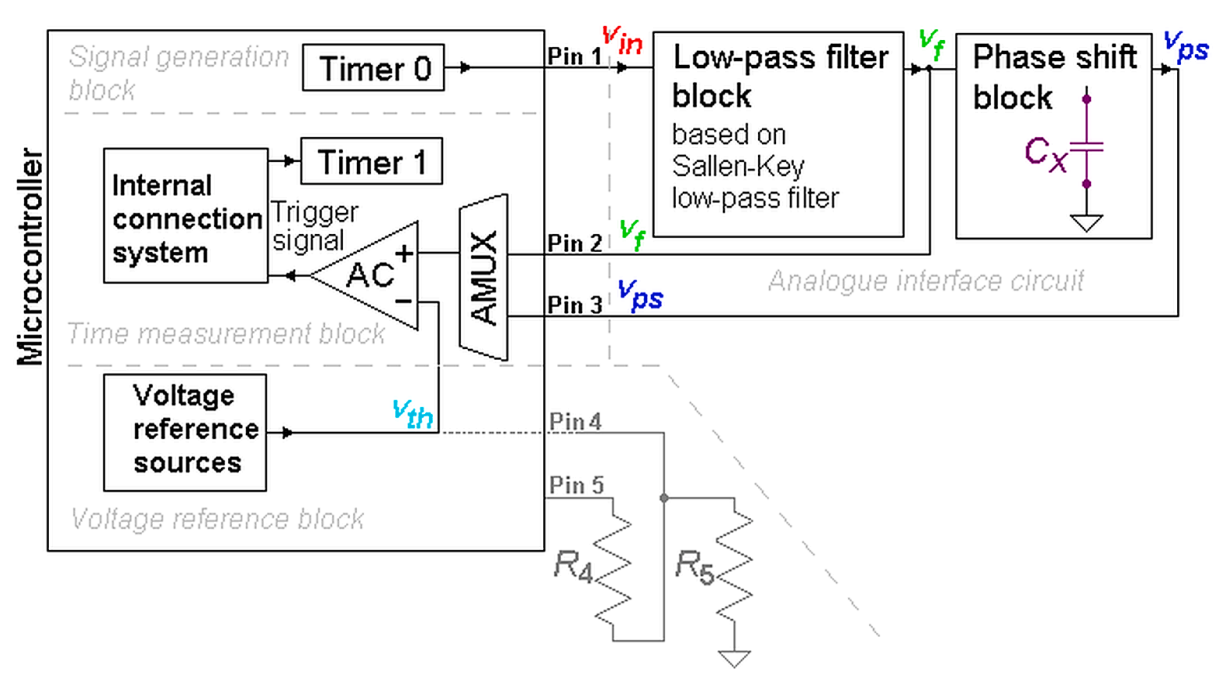


Rys 2.1. Schemat ideowy układu pomiarowego przesuwnika fazowego [4].

## Metoda pobudzenia sygnałem prostokątnym

Mikrokontroler zarządzający układem pomiarowym, ma dwa główne zadania. Generuje sygnał prostokątny o stałej częstotliwości (rys 2.2), wyznacza czas opóźnienia wprowadzanego poprzez filtr dolnoprzepustowy oraz układ opóźniający, zawierający badaną pojemność. Głównym zadaniem filtru dolnoprzepustowego jest transformacja sygnału prostokątnego, pochodzącego bezpośrednio z mikrokontrolera, na sygnał w przybliżeniu sinusoidalny. Pobudzanie członu RC sygnałem zmiennym powoduje przesunięcie w fazie i zmniejszenie amplitudy tego sygnału, na wyjściu wspomnianego bloku, zgodnie z analizą wskazową obwodu.

Mikrokontroler wyznaczając okresy przekroczenia wewnętrznego napięcia referencyjnego (najczęściej 2,56 V) [1], względem generowanego sygnału, ma możliwość matematycznego określenia pojemności badanej znajdującej się wewnątrz członu RCx. Momenty progowe wykrywane są za pośrednictwem, wbudowanego w mikrokontroler, modułu komparatora. Obecne na rynku mikrokontrolery, w niektórych przypadkach nie posiadają wewnętrznego napięcia odniesienia. W takim przypadku możliwym do symulacji   
tego potencjału, staje się dzielnik rezystancyjny, zbudowany w oparciu o rezystory R4 i R5. Zapewnienie stabilnego napięcia odniesienia, w przypadku tej metody jest elementem kluczowym, pozwalającym uzyskać akceptowalne dokładności pomiarowe. Podobną cechą charakteryzuje się częstotliwość taktowania mikrokontrolera. Zwiększenie rozdzielczości pozwala na dokładniejsze wyznaczenie różnic czasowych pomiędzy blokami układu pomiarowego.



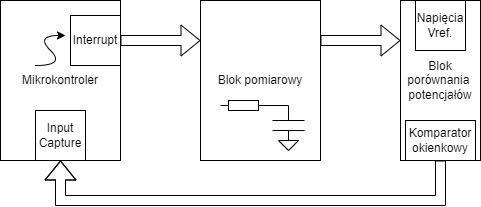
Rys 2.2. Schemat blokowy metody pomiarowej sygnałem prostokątnym [1].

## Metoda pomiaru ładowania/rozładowania RC

Czas ładownia oraz rozładowania pozwala określić, z wykorzystaniem modelu matematycznego [2], wartości pojemności badanej, przy znanej rezystancji ograniczającej. Zadaniem mikrokontrolera (rys 2.3), jest generacja sygnału prostokątnego, o częstotliwości zależnej od czasów ładowania/rozładowania pojemności badanej, oraz pomiar okresów generacji [3]. Wymagane jest, aby blok porównywania napięć progowych udostępniał sygnały binarne, informujące mikrokontroler o przekroczeniu dozwolonego napięcia. Wystąpienie takiego zdarzenia wywołuje zmianę stanu sygnału taktującego blok pomiarowy oraz początek zliczania okresu wystąpienia kolejnego zdarzenia.

Każdorazowe przekroczenie potencjałów progowych, przez ładowaną/rozładowywaną pojemność, powoduje wymuszenie obsługi przerwania, wewnątrz którego zostaje zapamiętany czas od poprzedniego wystąpienia zdarzenia. Wielokrotność pomiaru czasów pozwala   
na dodatkowe uśrednianie wyników. Mimo stosunkowo niewielkiej rozdzielczości zegara taktującego, mikrokontroler jest w stanie wyznaczyć bardzo dokładnie badane zależności. Działanie bloku porównania napięć referencyjnych oparte jest o komparator okienkowy,   
który wykrywa przekroczenie jednego z potencjałów odniesienia, przez ładunek zgromadzony wewnątrz badanej pojemności.

Moduł zliczającym czasy ładowania oraz rozładowania, osadzony jest wewnątrz mikrokontrolera i bezpośrednio steruje on systemem przerwań. Metoda ta posiada uniwersalny interfejs czujnik-mikrokontroler, dla MCU z wbudowanym modułem przechwytywania zdarzeń zewnętrznych.



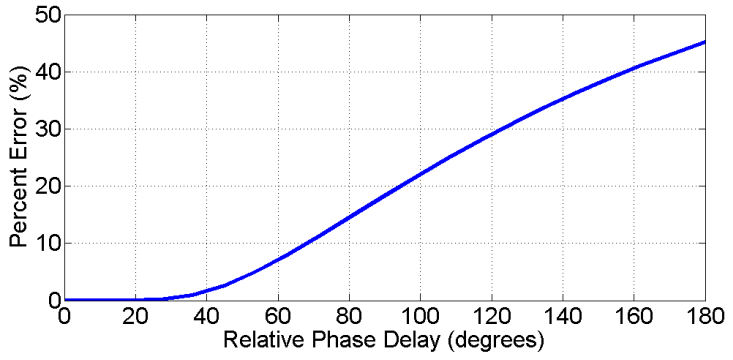
Rys 2.3. Schemat blokowy metody pomiarowej, bazującej na ładowaniu/rozładowaniu RC.

## Wybór metody pomiarowej

W celu realizacji projektu rozważono zalety i wady, każdej z wymienionych metod pomiarowych. Dokładny pomiar pojemności rzędu pF, wymusza zastosowanie systemu   
o niewielkich stratach, z ograniczonymi elementami pasożytniczymi i stabilnej pracy ciągłej. Charakter zastosowanej metody wymaga także rozdzielczości pomiarowej, która pozwoli   
8-bitowemu mikrokontrolerowi dokładnie wyznaczyć wartość pojemności badanej.

Metoda oparta o przesuwnik fazowy została wykluczona ze względu na brak przewidzianego momentu przełączenia bramki inwersyjnej, dołączonej do pojemności badanej. Noty katalogowe układów podają, że typową wartością jest połowa napięcia zasilania. Znajomość tej danej jest kluczowe dla dokładności pomiarowej. Tranzystory CMOS obwodów wejściowych, zamknięte w strukturze wewnętrznej krzemu, posiadają różne parametry ruchliwości nośników ładunku, w zależności od rodzaju kanału. Rozbieżność tych wartości zależna jest od czystości krzemu produkowanych układów, zatem parametry te mogą   
być odmienne w różnych partiach chipów. Czynnikiem dodatkowo wpływającym na punkt przełączenia stanu bramki jest temperatura otoczenia oraz samej struktury krzemowej,   
która pod wpływem wydzielanej mocy dodatkowo się ogrzewa, zmieniając tym samym napięcie przełączające.

Wadą przesuwnika fazowego jest także znacząco rosnący błąd względny,   
wraz ze wzrostem przesunięcia fazowego (rys 2.4). Chęć uzyskania wysokiej precyzji wymusza zastosowanie maksymalnych przesunięć sięgających granicy 20°. Pomiar opóźnienia mierzony za pomocą liczników nie zapewnia wystarczającej rozdzielczości pomiarowej, ze względy   
na niewielkie różnice czasowe oraz ograniczoną rozdzielczość mikrokontrolera. Czynnikiem zmniejszającym błąd jest zastosowanie tranzystorów MOS [5], których zadaniem jest całkowite rozładowanie lub naładowanie pojemności, w momencie przełączenia stanów logicznych sygnału PWM. Zabieg ten poprawia charakterystykę, jednak wnosi do układu znaczne pojemności pasożytnicze, które wymagają doświadczalnego wyznaczenia i korekcji.

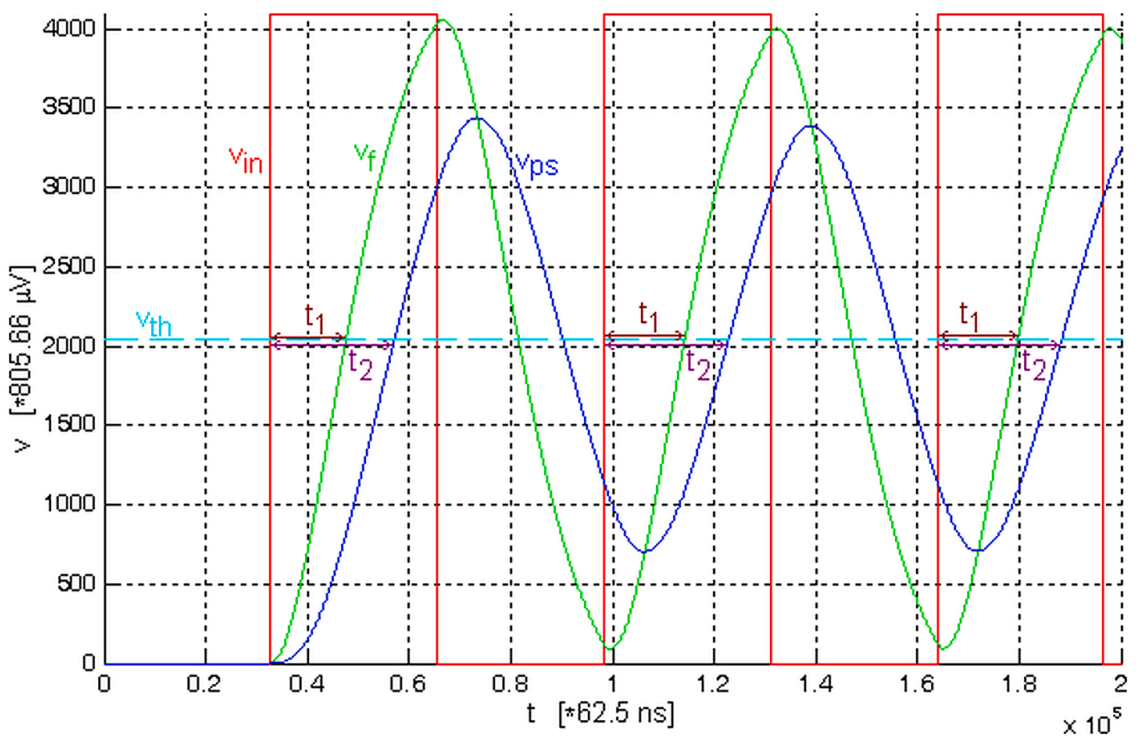


Rys 2.4. Charakterystyka błędu względnego, w zależności przesunięcia fazowego [5].

Metoda pobudzenia sygnałem prostokątnym [1], również posiada wady, wykluczające   
ją z realizacji fizycznej. Wybrany zakres mierzonych pojemności nie jest łatwo konfigurowalny, bowiem polega na przestrojeniu filtru konwertującego sygnał prostokątny oraz zmianie częstotliwości sygnału taktującego. Zbyt wysoka wartość częstotliwości znacząco ogranicza możliwości pomiarowe, gdyż dokonywane są w domenie czasowej (rys 2.5). Czynnikiem oddziałującym staje się rozdzielczość zegara taktującego mikrokontroler. Dobór odpowiedniej częstotliwości staje się kluczowym czynnikiem, wpływającym na dokładność pomiarową.

Zakładany zakres mierzonych pojemności w realizacji projektowej, określono od 100   
do 300 pF. Tak szeroki zakres, przy zachowaniu akceptowalnej rozdzielczości mierzonej pojemności (0,1 pF) wymagałby zastosowania częstotliwości taktujące, na poziomie 180 Hz. Następne kolekcjonowanie serii 128 wyników, implikowałoby czas odpowiedzi układu pomiarowego około 1 s. Dodatkowym czynnikiem wpływającym na dokładność są straty wprowadzane przez filtr dolnoprzepustowy, każdorazowa konfiguracja filtru wymusza wyznaczenie współczynników tłumienia dla zadanej częstotliwości.

Metoda pomiarowa oparta o pomiar czasu ładowania i rozładowania członu RC zapewnia największą dokładność pomiarową spośród wybranych [2]. Dodatkową zaletą   
jest prostota konfiguracji napięć referencyjnych oraz rezystancji pomiarowych. Czasy ładowania i rozładowania zależą od rezystancji członu, zatem zakres pomiarowy zostaje ustalony   
za pomocą jednego, łatwo konfigurowalnego elementu. Straty wynikające z funkcjonowania układu pomiarowego zależą wyłącznie od prądów polaryzujących obwody wejściowe zastosowanych komparatorów. Metoda wprowadza także elementy pasożytnicze, nisko zależne od warunków otoczenia. Zapewnienie stabilnego napięcia zasilającego oraz referencyjnych gwarantuje wysoką precyzję pomiaru. Metoda ładowania/rozładowania RC spełnia wszystkie założone cele projektowe, co zaważyło na jej realizacji w układzie rzeczywistym.



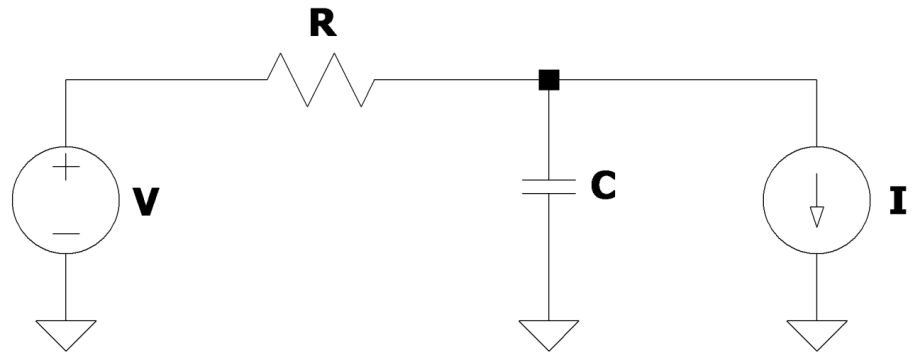
Rys 2.5. Sygnały panujące w metodzie pobudzenia sygnałem prostokątnym [1].

# 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.

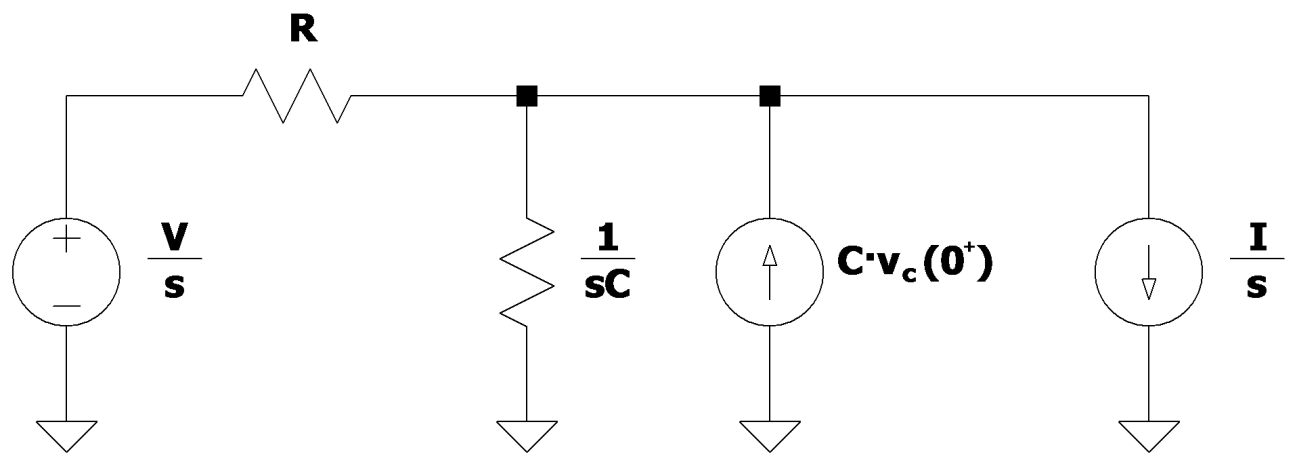
## Analiza operatorowa obwodu

Obwód pomiarowy można przedstawić przy pomocy idealnych źródeł prądowych   
i napięciowych (rys 3.1). Źródło prądowe (I) symbolizuje prąd wejściowy komparatorów (prąd polaryzujący tranzystory wejściowe układu scalonego). Zgodnie z dokumentacją układu TLV3502AID, prąd ten może osiągać maksymalne wartości ± 20 pA [16]. 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 , w układzie pomiarowym będzie obowiązywać stan nieustalony. Do opisu matematycznego takich stanów służy analiza operatorowa [6] (rys 3.2).



Rys 3.2. Analiza operatorowa obwodu pomiarowego.

Pojemność zastąpiono równoległym połączeniem rezystancji o wartości   
oraz źródła prądowego o wartości , gdzie oznacza wartość chwilową napięcia na pojemności w chwili czasu . Rezystancja ma charakter liniowy, dlatego nie podlega przekształceniom operatorowym.

Do rozwiązania układu wykorzystano metodę potencjałów węzłowych, w tym celu należało dokonać kolejnego przekształcenia (rys 3.3), w którym zamieniono rzeczywiste źródło napięciowe utworzone z elementów rezystancji oraz źródła , na rzeczywiste źródło prądowe.

C:\Users\Arek\Desktop\Praca Dyplomowa\Praca\Img\MathDescTransform.emf

Rys 3.3. Przekształcony obwód pomiarowy w dziedzinie operatorowej.

Dysponując modelem po przekształceniach możliwe jest wyprowadzenie wzoru   
na napięcie w węźle , czyli na badanej pojemności (1.1).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.1) |

Po przekształceniach wzoru 3.1 oraz dokonaniu odwrotnej transformaty Laplace’a otrzymano wzór (3.2) opisujący napięcie w dowolnej chwili czasu stanu nieustalonego.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.2) |

Podobnie przekształcając wzór uzyskano zależność czasu ładowania   
oraz rozładowania pojemności od wartości tej pojemności (3.3). Wybór obliczeń ładowania   
bądź rozładowania zależy od wartości parametrów użytych we wzorze, ponieważ wyznaczanie czasu ładowania pojemności będzie obejmowało inne warunki początkowe oraz inne wartości napięcia wyjściowego z bufora trójstanowego (V).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.3) |

W kolejnym przekształceniu wzoru otrzymano wartość pojemności, w zależności   
od znanego czasu ładowania lub rozładowania (3.4). Parametry oraz przyjmują stałą wartość na czas trwania stanu nieustalonego. Wyznaczanie pojemności może przebiegać zarówno z pomierzonego czasu ładowania jak i rozładowania, dla obu przypadków parametry oraz będą posiadały różną wartość.

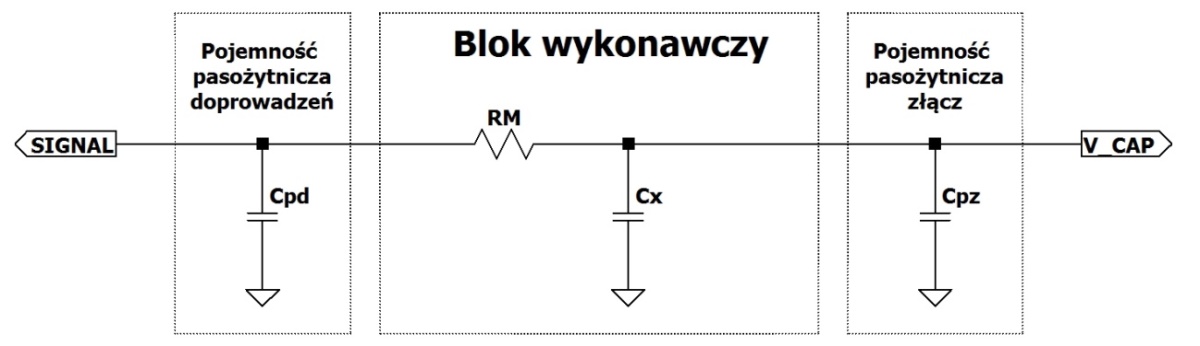
|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.4) |

## Symulacja SPICE

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

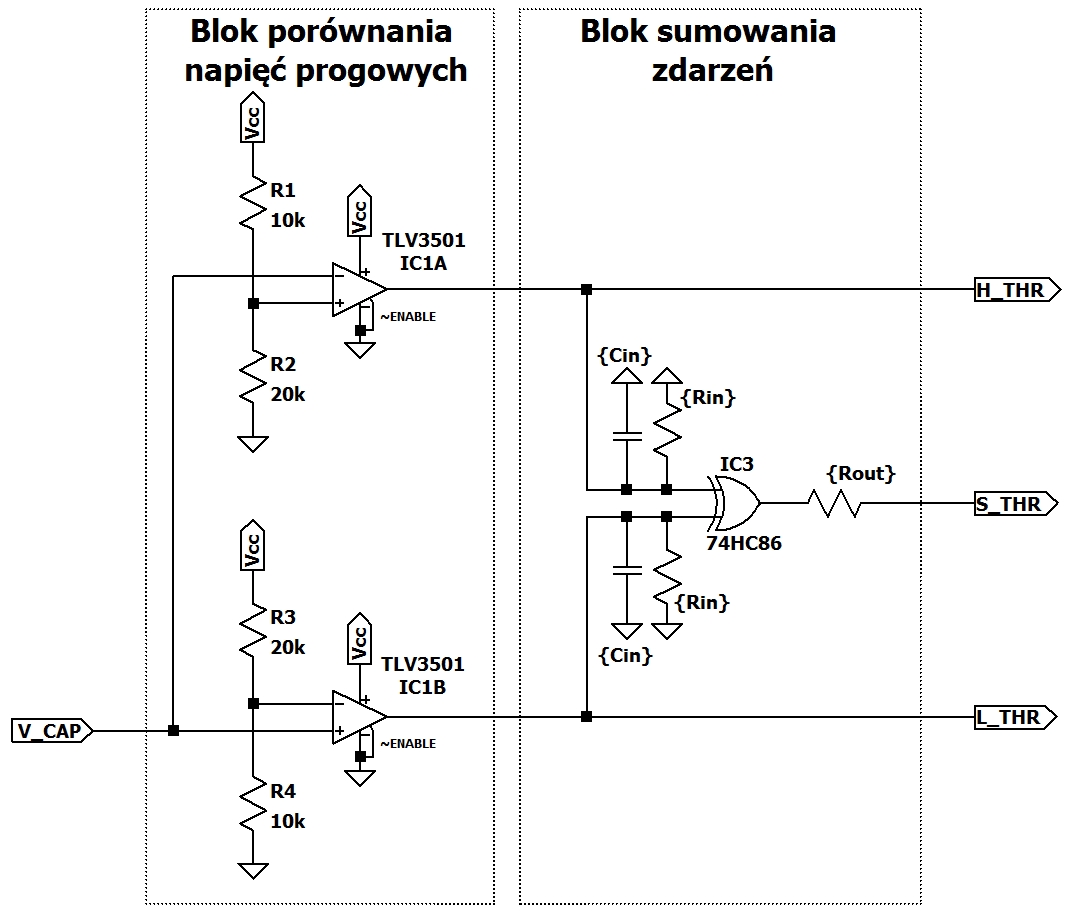
### Podbloki układu

Blok pomiarowy (rys 3.4) symuluje pojemności pasożytnicze związane ze ścieżkami doprowadzającymi oraz pojemności złącz pomiarowych i diagnostycznych. Do wyprowadzenia SIGNAL dołączono jedno z wyjść mikrokontrolera poprzez trójstanowy bufor. Badana pojemność Cx oraz rezystor pomiarowy RM tworzą człon RC. Rezystor ogranicza prąd ładowania i rozładowania pojemności przez sygnał taktujący. Ważnym parametrem   
jest wartość rezystancji, ponieważ zbyt wysoka spowoduje, że prądy polaryzujące komparatorów nasycą układ pomiarowy. W takim wypadku ograniczony prąd popłynie   
do obwodów wejściowych, nie ładując pojemności badanej.



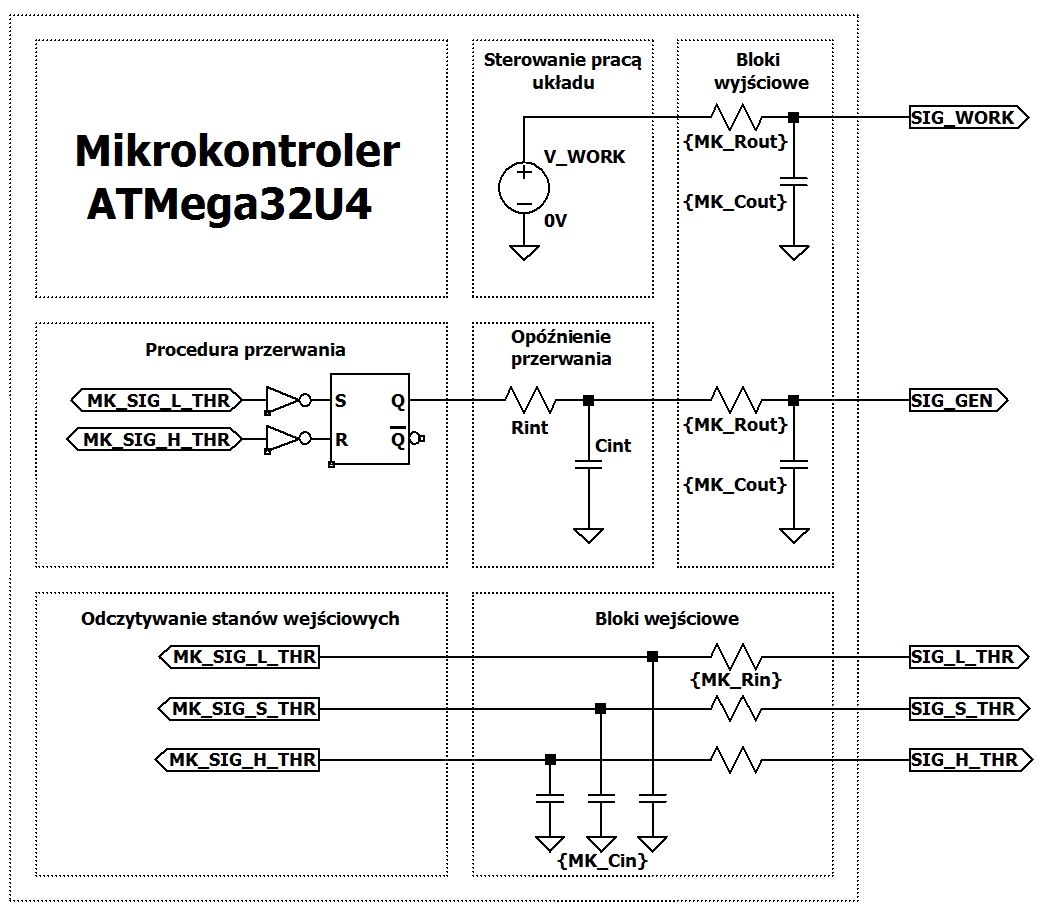
Rys 3.4. Schemat bloku pomiarowego – symulacja.

Blok przetwarzający napięcie występujące na badanej pojemności (rys 3.5) składa   
się z komparatora okienkowego, które porównują poziom napięcia do zadanych progów.   
Jeżeli napięcie uzyska poziom większy od górnego napięcia odniesienia, lub mniejszy   
od dolnego, będzie to skutkowało ustaleniem stanu wysokiego na wyjściu bramki XOR.   
Zbocze narastające tego sygnału spowoduje aktywowanie przerwania i zmianę stanu sygnału taktującego przez mikrokontroler.



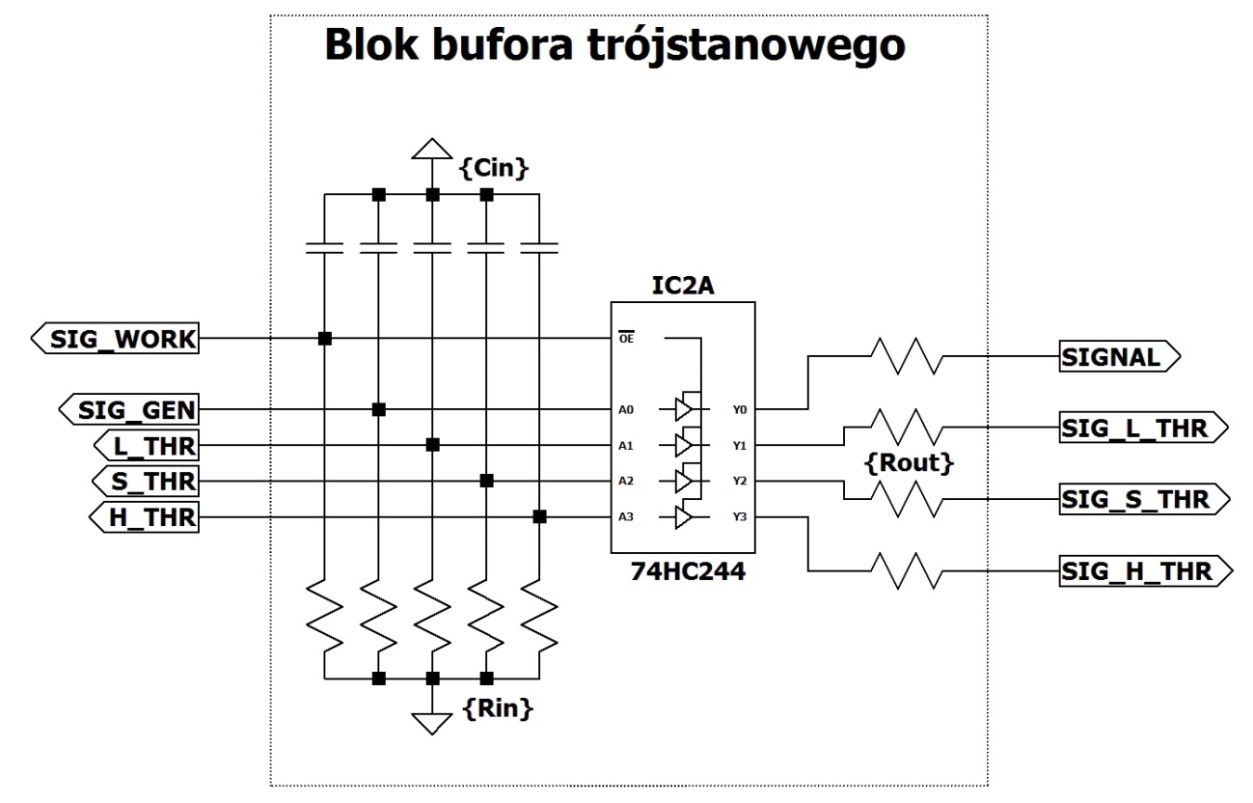
Rys 3.5. Schemat bloku porównywania napięć progowych – symulacja.

Blok symulujący działanie mikrokontrolera (rys 3.6) 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 3.6. Schemat podłączenia mikrokontrolera – symulacja.

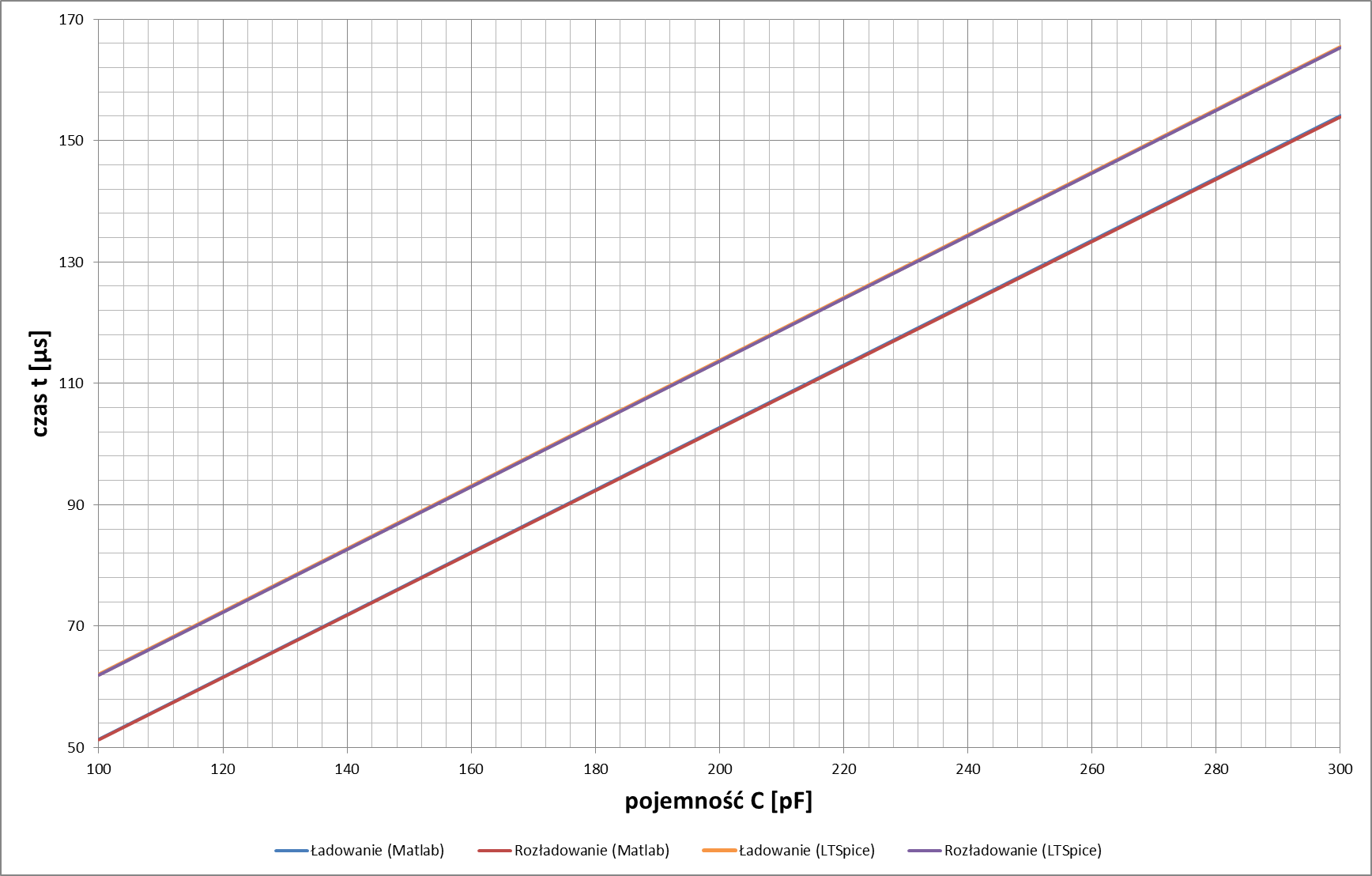
Blok bramki trójstanowej (rys 3.7) obejmuje pojemności i rezystancje pasożytnicze wejść układu. Wykorzystane do projektu bramki i bufory są wykonane w technologii CMOS, która cechuje się pojemnością pasożytniczą bramki tranzystora oraz niewielkim prądem upływu. Te parametry zostały zaimplementowane na poczet symulacji w postaci pojemności   
oraz rezystancji . 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 na wyjściach.Do projektu wykorzystano bufor, ponieważ parametry jego wyjść są bardziej optymalne w porównaniu   
do wyjść mikrokontrolera (mniejsze pojemności i rezystancje pasożytnicze). Parametryzowanie obwodu pozwala na szybie dostosowanie symulacji po realizacji fizycznego układu.   
Prawdą jest, że wejścia i wyjścia układów scalonych mogą posiadać różne wartości pojemności pasożytniczej, nawet w obrębie pojedynczego układu. Wynika to ze struktury krzemowej   
oraz nieczystości krzemu wykorzystanego do produkcji. Dlatego też symulacja nie odzwierciedli zachowania rzeczywistego układu, w którym panuje znacznie więcej zjawisk.



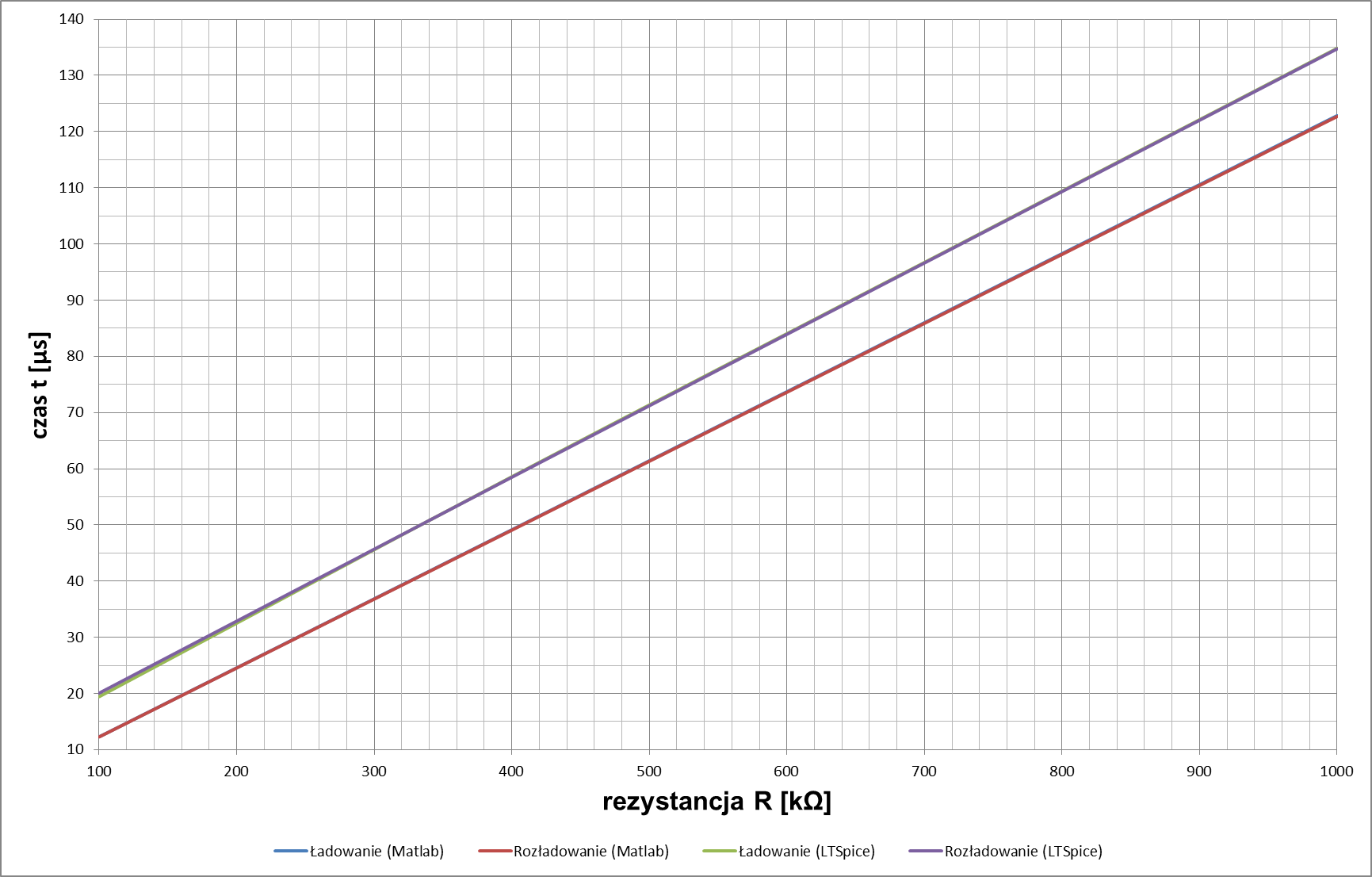
Rys 3.7. Schemat bufora trójstanowego – symulacja.

### Wyniki

Symulacje umożliwiają pomiar czasu ładowania i rozładowania. Niewielki prąd polaryzujący komparatorów powoduje, że czasy te są zbliżone, ale nie są sobie równe.   
Podczas realizacji fizycznej, zachodzi konieczność doświadczalnego wyznaczenia prądu polaryzacji, aby umożliwić dokładny pomiar. Charakterystyka czasu ładowania i rozładowania wyznaczone drogą obliczeń oraz symulacji ma charakter w przybliżeniu liniowy (rys 3.8). Charakterystyka pozwala na zobrazowanie wpływu pojemności i rezystancji pasożytniczych, które nie zostały wzięte pod uwagę w modelu matematycznym. Występowanie elementów pasożytniczych w układzie pomiarowym wydłuża czas ładowania i rozładowania pojemności, wszystko to spowodowane jest poprzez zwiększoną sumaryczną pojemność elementu badanego oraz elementów pasożytniczych. Dodatkowym czynnikiem wpływającym   
na czas pomiaru jest obsługa przerwania. Opóźnienie jakie zostaje wprowadzone szacuje   
się na około 4 µs. Na ten czas składa się wywołanie przerwania, które wynosi 5 cykli zegara   
oraz wykonanie instrukcji wewnątrz przerwania. Wszystkie z powyżej wspomnianych elementów powoduje przesunięcie charakterystyki, w stronę wyższych czasów ładowania   
i rozładowania, o około 10 μs w całym mierzonym zakresie pojemności. W celu kompensacji elementów pasożytniczych, w obliczeniach została zawarta funkcja korygująca zmierzoną pojemność. Współczynniki funkcji zostały wyznaczone doświadczalnie, na podstawie pomiarów znanych, dokładnych wartości pojemności.



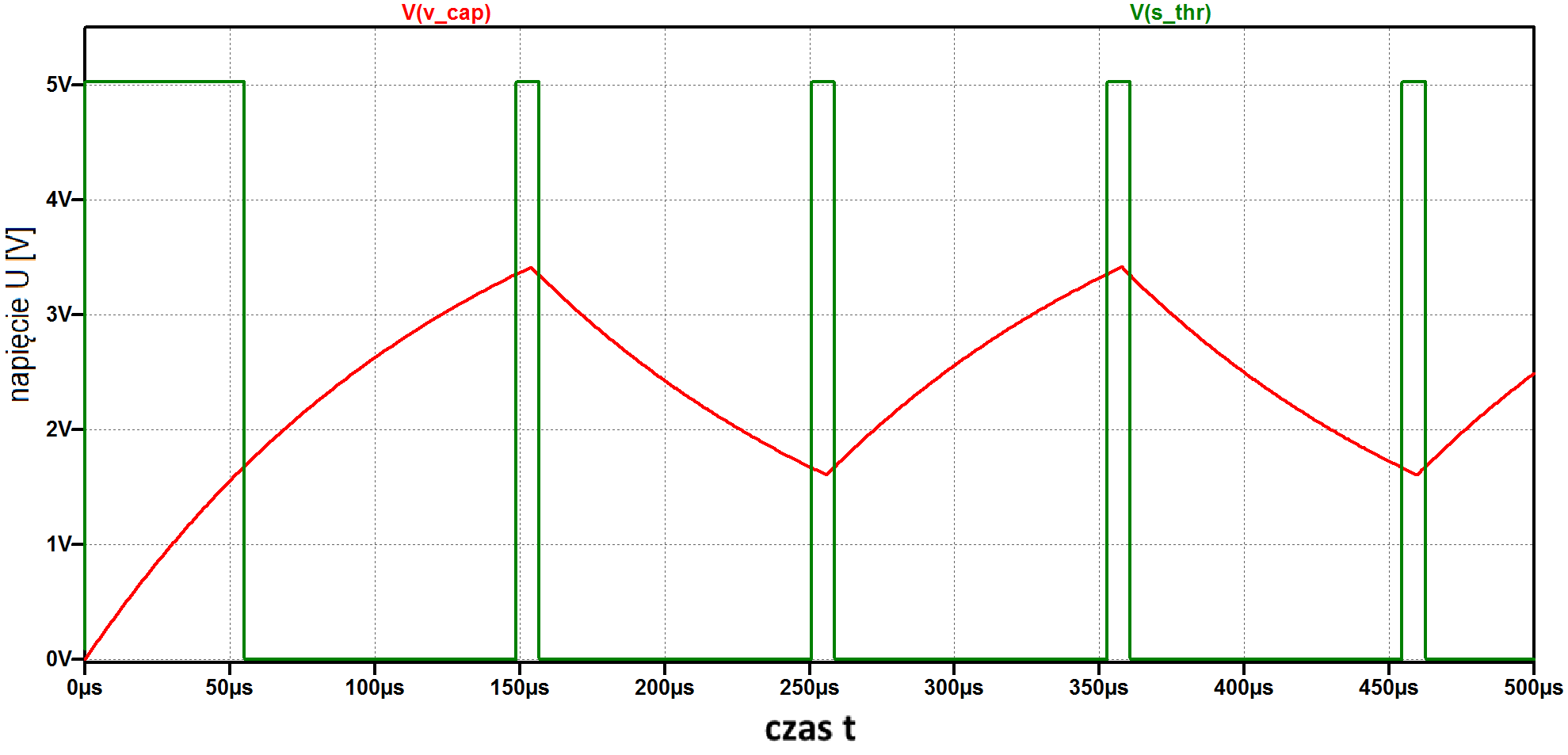
Rys 3.8. Charakterystyka czasu ładowania i rozładowania dla rezystancji R = 741,2 kΩ.



Rys 3.9. Charakterystyka czasu ładowania i rozładowania dla pojemności C = 177,2 pF.

Wyznaczona charakterystyka czasu ładowania i rozładowania pojemności badanej C = 177,2 pF przy zmianie rezystancji rezystora pomiarowego w zakresie od 100 kΩ do 1 MΩ (rys 3.9) ukazuje w przybliżeniu liniową zależność [3]. Przesunięcie charakterystyki wywołane wystąpieniem elementów pasożytniczych w układzie pomiarowym wprowadza nierównomierne przesunięcie charakterystyki układu idealnego. Oznacza to, że dla każdej wybranej rezystancji będą wymagane inne współczynniki korekcji charakterystyki. Dodatkową cechą   
jaką zaobserwowano podczas symulacji jest ugięcie charakterystyki ładowania w zakresie niskich wartości rezystancji tj. mniejszych od 200 kΩ. Różnice czasowe ściśle są powiązane   
z opóźnieniem wprowadzanym przez przerwanie. Czym mniejsza rezystancja tym w krótszym czasie badany element zgromadzi większy ładunek, powodując że po przełączeniu sygnału taktującego większy ładunek musi zostać oddany. Dlatego zaleca się wybór rezystancji większych bądź równych od 200 kΩ. Czym rezystancja jest większa, tym wynik pomiarowy   
jest dokładniejszy. Jednak zbyt duża wartość rezystancji prowadzi do zjawiska,   
w którym ograniczony tą rezystancją prąd zdoła jedynie nasycić prądy polaryzujące obwodów wejściowych komparatorów. W takiej sytuacji badana pojemność nie zgromadzi ładunku   
w czasie pomiaru. Wartość maksymalnej rezystancji, zapewniającej poprawność pomiaru została określona symulacyjnie na około 3 MΩ, natomiast w układzie rzeczywistym zachodzą również inne zjawiska, nie wzięte pod uwagę podczas symulacji.

Przykładowa charakterystyka obrazująca metodę pomiaru z uwzględnieniem elementów pasożytniczych (rys 3.10) pomaga użytkownikowi zrozumieć podstawę pomiaru. W układzie rzeczywistym udostępniono możliwość podejrzenia przebiegów przy pomocy oscyloskopu. Pomiar sondą oscyloskopową nie odda jednak rzeczywistych warunków panujących podczas pomiaru, gdyż wnosi ona pewną, dodatkową pojemność pasożytniczą w układ pomiarowy. Przekroczenie jednego z progów napięć referencyjnych objawia się wygenerowaniem dodatniego impulsu sygnału S\_THR, co analizowane jest przez mikrokontroler.



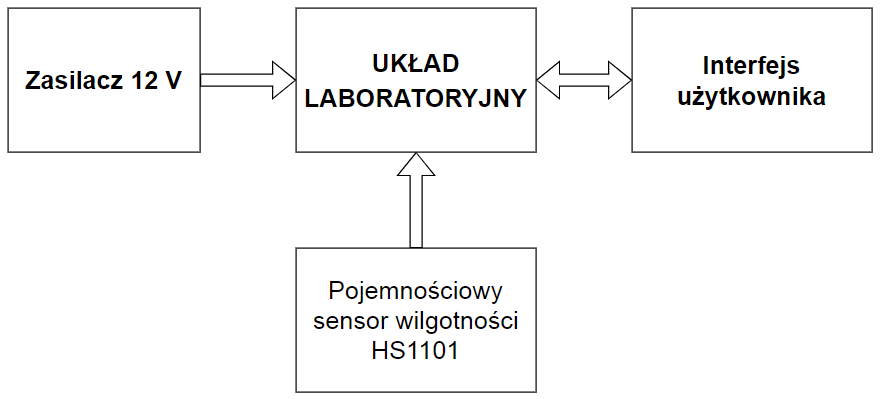
Rys 3.10. Charakterystyka sygnałów w czasie pomiaru, C = 177,2 pF, R = 741,2 kΩ.

# 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.

## 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 [14], 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 obliczenia oraz generuje skrypt programu Matlab, w którym użytkownik może dostosować   
do swoich wymagań wyniki pomiarowe. Interfejs użytkownika udostępnia możliwość zmian ustawień układu laboratoryjnego, mi. 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 komunikację.

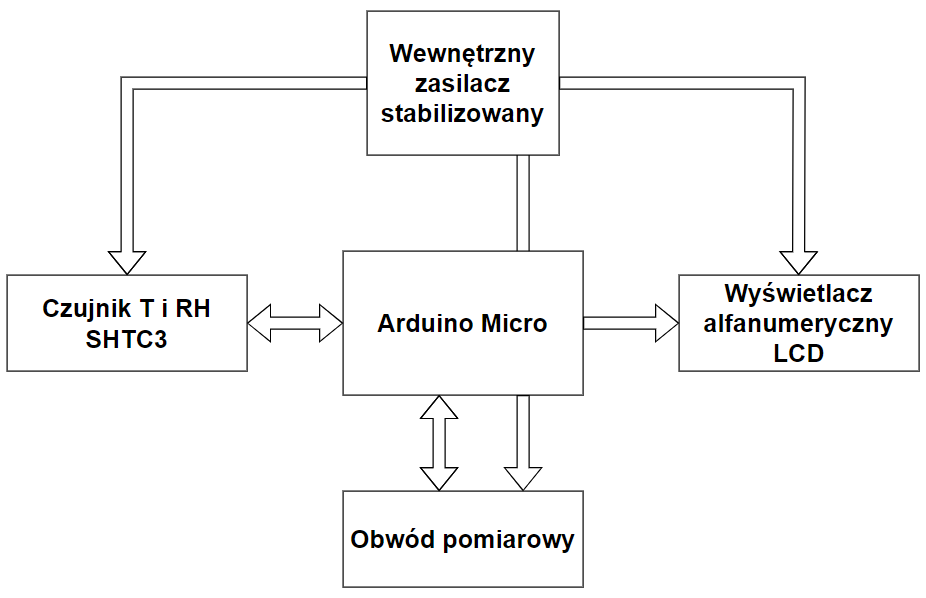


Rys 4.1. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego.

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.

## Inteligentny czujnik pojemnościowy

Głównym blokiem zarządzającym układem laboratoryjnym jest Arduino Micro,   
jest on połączony z obwodem pomiarowym (rys 4.2). Komunikacja z obwodem pomiarowym odbywa się poprzez uniwersalny interfejs czujnik-mikrokontroler dla mikrokontrolerów   
z modułem przechwytywania zdarzeń zewnętrznych. Stabilny i dokładny pomiar zapewnia wewnętrzny zasilacz stabilizowany. Aby dodatkowo ograniczyć pobierany prad 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.



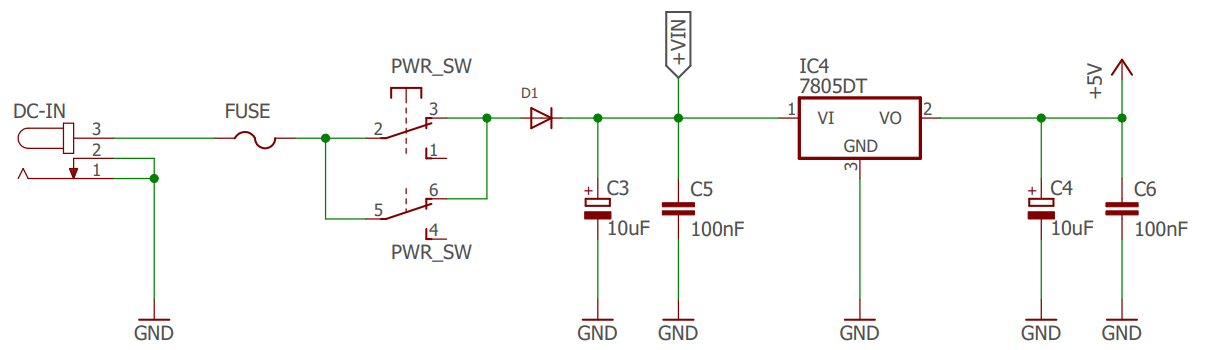
Rys 4.2. Schemat blokowy układu laboratoryjnego.

## Układ zasilania

Stabilność napięcia zasilającego z punku 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 3.4 jest napięcie sygnału taktującego blok pomiarowy. Parametr ten wyklucza użycie zasilania z portu USB,   
ze względu na niestabilność napięcia, które może wahać się od 4,5 do 5,5 V [11].

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 mV/oC [15].   
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 [15]. 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 powinna znajdować się w zakresie od 100 kΩ do 1 MΩ, zatem w trakcie pełnego rozładowania pojemności prąd ten będzie znacząco ograniczony,   
nie wpływając tym samym na stabilizowane napięcie.

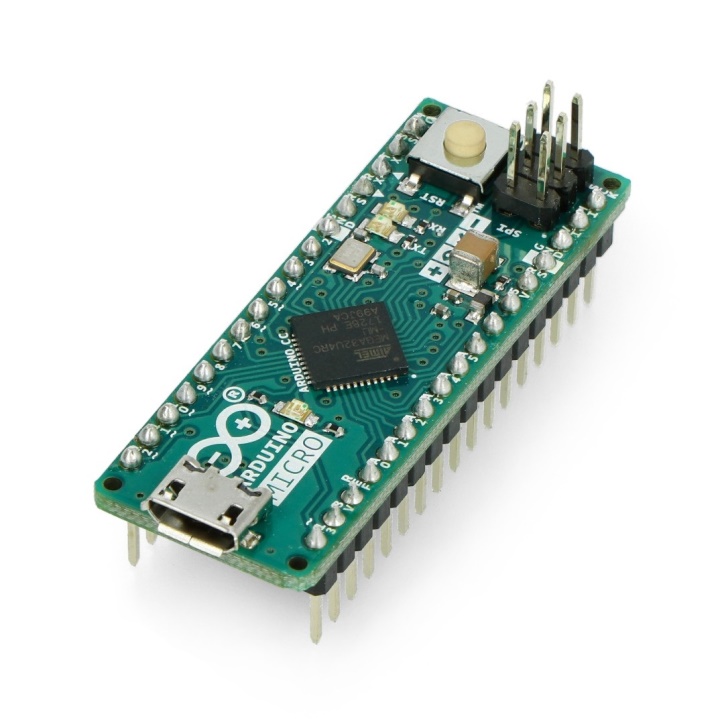
Układ zasilania został wyposażony w diodę prostowniczą, zabezpieczającą układ laboratoryjny przed podłączeniem zewnętrznego napięcia zasilającego o odwrotnej polaryzacji. Stabilizator napięcia do poprawnej pracy potrzebuje nadwyżkę 2 V zewnętrznego napięcia zasilania w stosunku do napięcia stabilizowanego,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



Rys 4.3. Schemat ideowy układu zasilającego.

## Moduł Arduino Micro

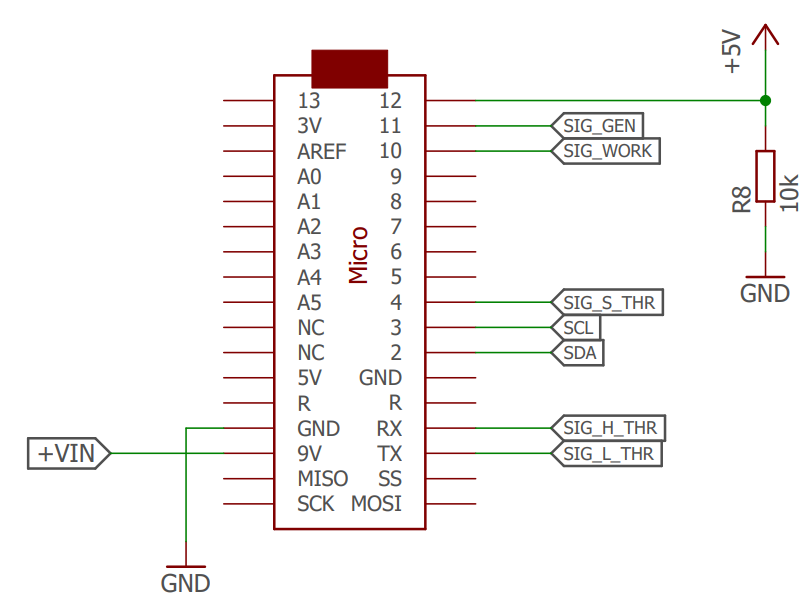
Wykorzystany moduł Arduino Micro (rys 4.4) oparty jest o 8 bitowy mikrokontroler ATmega32U4 posiada wbudowane złącze Micro USB oraz rezonator kwarcowy o częstotliwości 16 MHz [12]. Na płytce PCB znajduje się także złącze do programowania szeregowego ISP, oraz 3 diody elektroluminescencyjne, które w projekcie 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 [10].

Podłączenie bloku Arduino Micro (rys 4.5) odbywa się z wykorzystaniem interfejsu TWI (SDA, SCL) [11] z modułami wyświetlacza alfanumerycznego LCD oraz z czujnikiem temperatury i wilgotności względnej SHTC3. Magistralowa topologia pozwala na łatwą konfigurację i przyśpiesza rozbudowę układu. Sygnały wyjściowe, sterujące obwodem pomiarowym, to mi. 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.

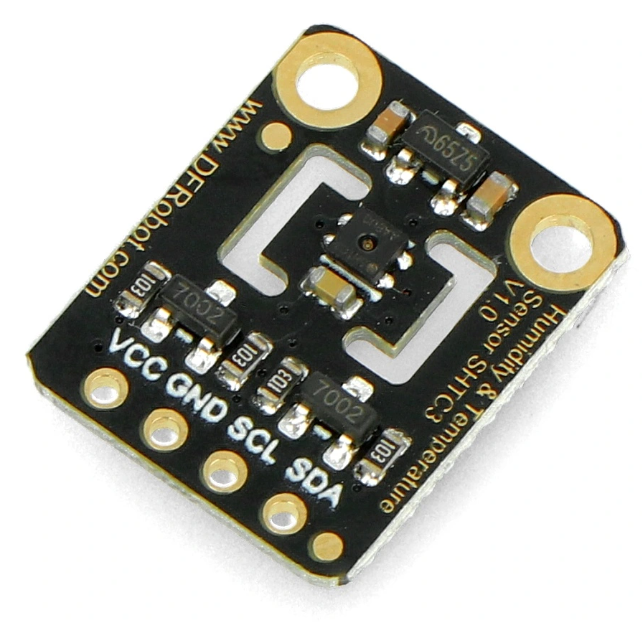


Rys 4.5. Schemat ideowy podłączenia modułu Arduino Micro.

## 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 ±2 % RH [13]. 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 płytce 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 [10].

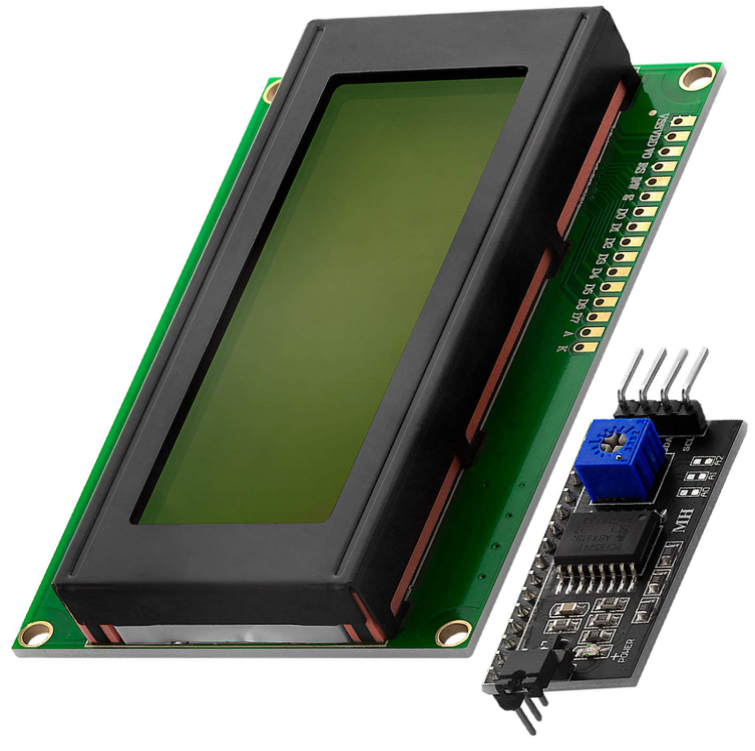


Rys 4.6. Moduł SHTC3 [10].

## 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   
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 [10]. 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 kΩ.

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.

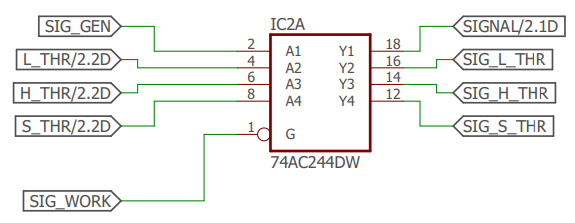


Rys 4.7. Moduł wyświetlacza alfanumerycznego LCD [10].

## 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.

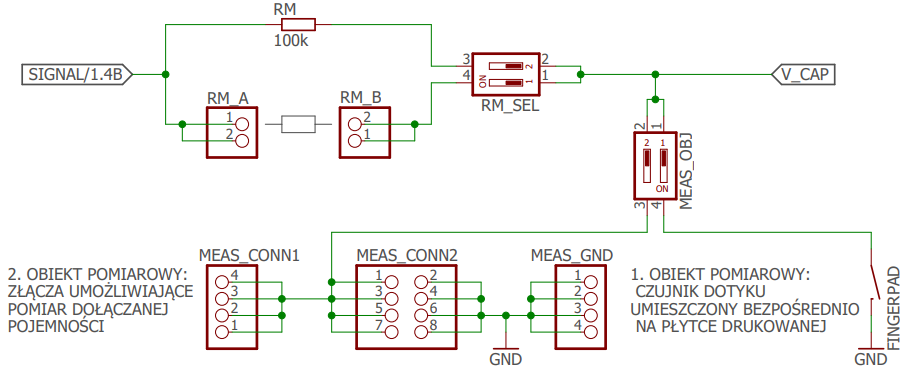
Bufor trójstanowy pełni rolę izolacji obwodu wykonującego pomiar, od mikrokontrolera (rys 4.8). Ze względu na wysoką integrację struktury krzemowej, wyjście mikrokontrolera posiada większe pojemności pasożytnicze. Dodatkowo, zwiększona stabilność napięcia wyjściowego oraz większy prąd uzyskiwany z wyjścia, są cechami buforów trójstanowych. Kolejną zaletą tych układów jest dodatkowy stan wysokiej impedancji, co znacząco mniejsza pobór prądu w stanie uśpienia układu [17].



Rys 4.8. Schemat ideowy bufora trójstanowego.

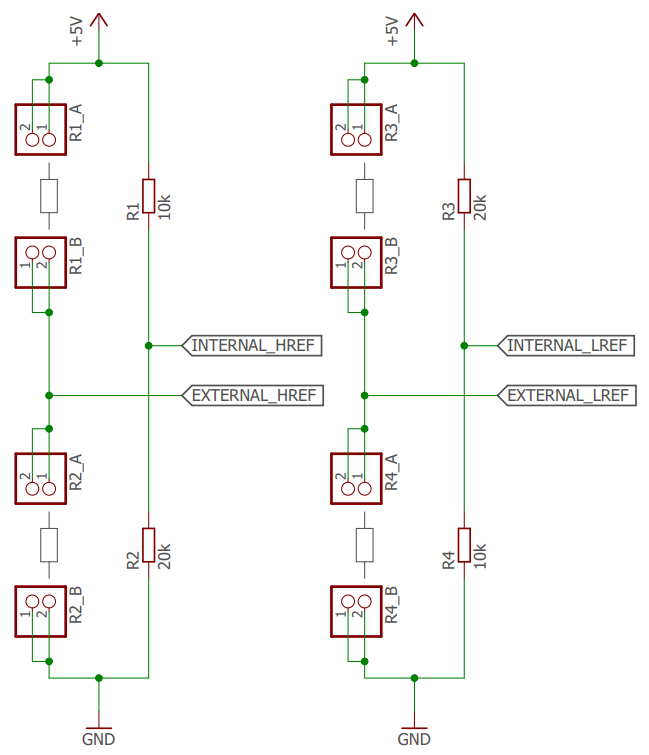
Człon pomiarowy RC (rys 4.9) składa się z rezystora pomiarowego RM oraz dołączanej pojemności badanej. Dodatkowo, na płytce PCB zaimplementowano czujnik dotyku,   
którego działanie opiera się na zmianie pojemności pod wpływem przyłożonego palca. Pojemność rośnie wraz ze wzrostem powierzchni stylu czujnika oraz skóry człowieka.   
Na pojemność mają również wpływ parametry skóry np. jej wilgotność. Podłączenie czujnika natomiast dobywa się poprzez listwy kołkowe. Do wyboru obiektu pomiarowego służą przełączniki DIPSWITCH.

Wartość rezystancji rezystora pomiarowego jest jednym z parametrów obliczeniowych, dlatego należy zmierzyć tą wartość z możliwie największą dokładnością. Układ laboratoryjny umożliwia podłączenie rezystora wybranego przez użytkownika. Wartość rezystancji wbudowanej w układ pomiarowy wynosi 100 kΩ. Wybór wbudowanego lub zewnętrznego rezystora pomiarowego możliwy jest przez konfigurację przełączników DIPSWITCH.



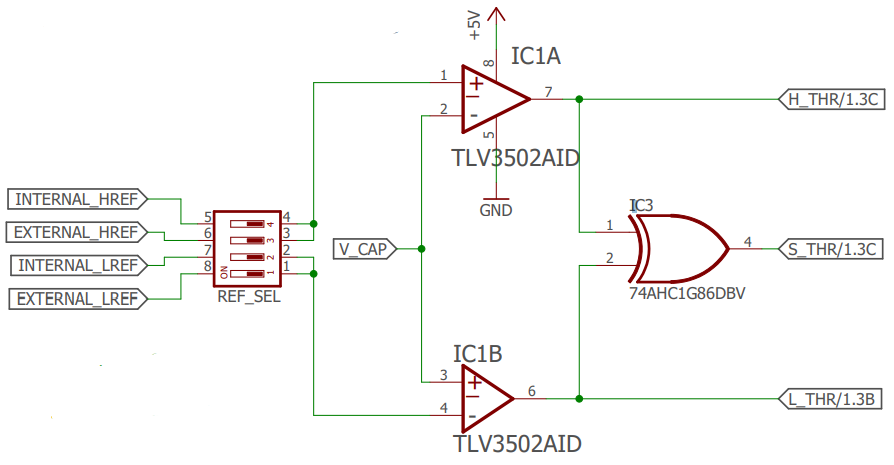
Rys 4.9. Schemat ideowy członu pomiarowego RC.

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 wydziela 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.

Tor przetwarzania sygnału pomiarowego (rys 4.11) oparty jest o komparator okienkowy. Dla dokładności pomiarowej, ważne jest aby dobrać komparator o możliwie najmniejszym prądzie polaryzacji obwodów wejściowych. Wybrany został układ TLV3502AID, którego parametry są wystarczające do zapewnienia należytej dokładności pomiarowej,   
a zarazem posiada on przystępną cenę. Prąd polaryzacji został określony w dokumentacji   
na wartość ± 20 pA [16]. Ważnym parametrem jest także napięcie niezrównoważenia,   
które określa przesunięcie charakterystyki przejściowej, od idealnego komparatora. Wartość   
ta została zapewniona przez producenta w zakresie 1 – 6,5 mV [16]. Natomiast czas propagacji sygnału wyjściowego tego układu wynosi 12 ns [16]. Wartość ta jest kilku krotnie mniejsza   
od jednego cyklu zegarowego mikrokontrolera, która dla zegara 16 MHz wynosi 62,5 ns.   
Zatem czas propagacji nie wpłynie na opóźnienie odczytu sygnałów przez mikrokontroler.   
Chęć wykorzystania modułu przechwytywania zdarzeń zewnętrznych wymusza sprowadzenie obu sygnałów progowych do jednej linii. Za tę cechę jest odpowiedzialna bramka logiczna XOR. Suma obu sygnałów progowych jest automatycznie rozpoznawana przez mikrokontroler.

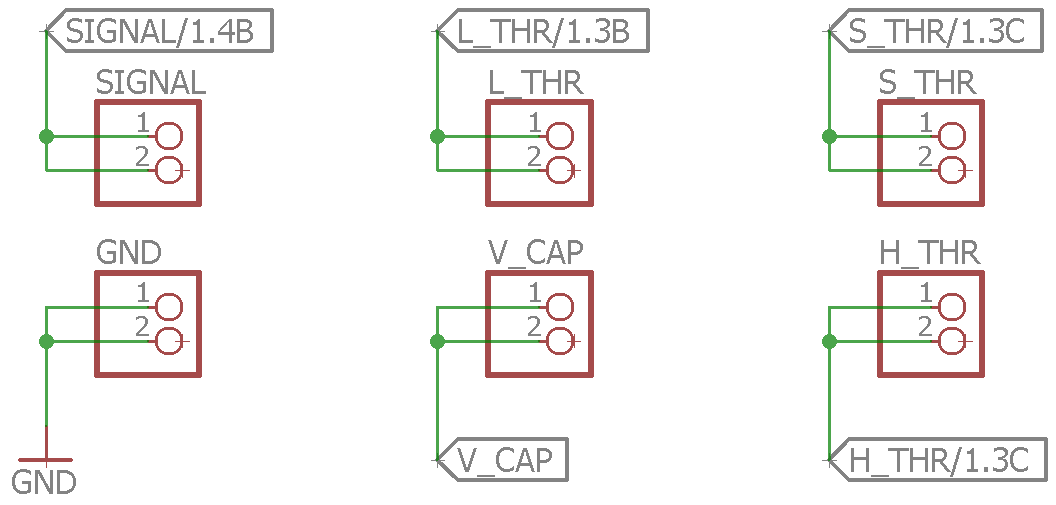


Rys 4.11. Schemat ideowy toru przetwarzania sygnału pomiarowego.

## 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 trójstanowego. 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.



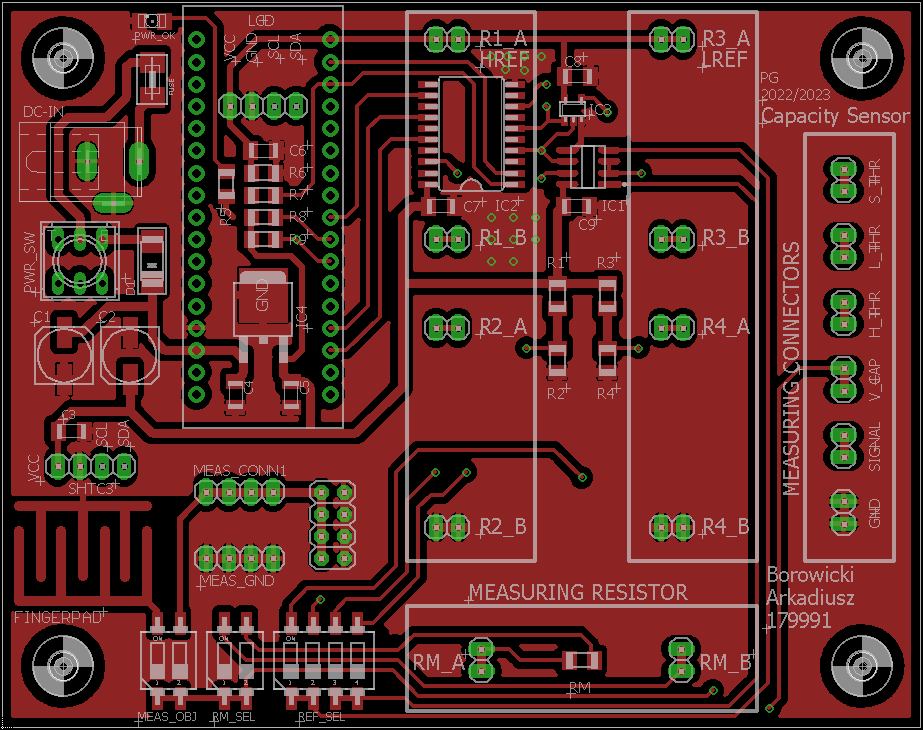
Rys 4.12. Schemat ideowy złącz diagnostycznych.

## Layout PCB

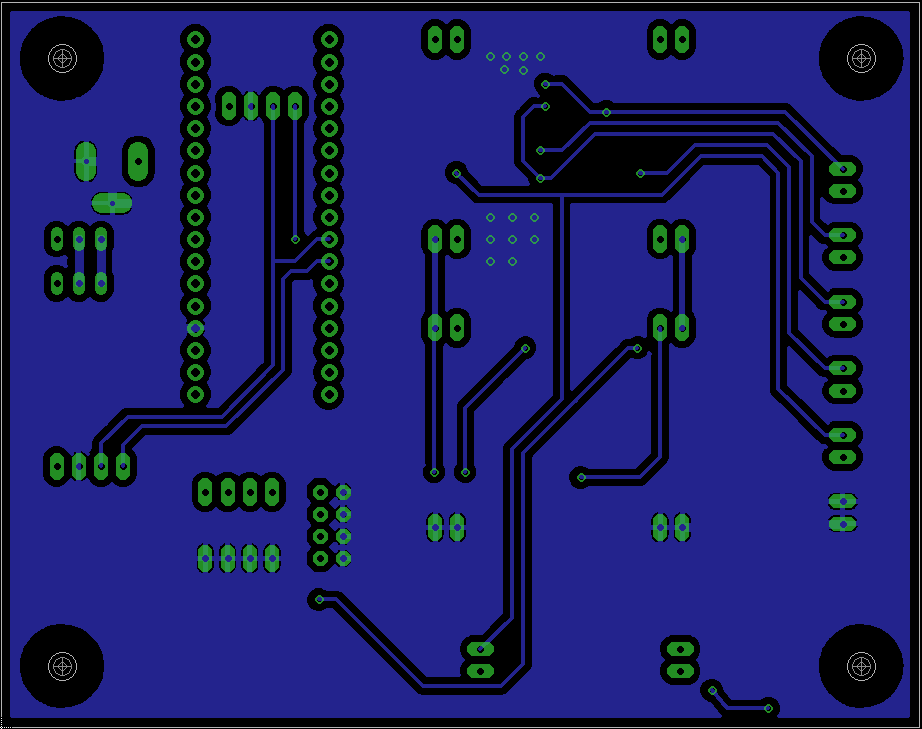
W podrozdziale zostanie zaprezentowany projekt mozaiki PCB oraz realizacja rzeczywistego układu. Szczególną uwagę poświęcono sposobom prowadzenia ścieżek   
oraz umiejscowienia elementów elektronicznych.

### Projekt

Projekt mozaiki PCB został opracowany przy użyciu programu Autodesk Eagle   
(rys 4.13; rys 4.14). Wynikowa płytka posiada wymiary 105 x 83 mm. Projekt wykonano   
w formie 2 stronnej płytki o szerokości ścieżek sygnałowych na poziomie 16 milsów   
oraz ścieżek zasilających – 40 milsów. Podane szerokości ścieżek są wystarczające   
to zapewnienia minimalnej rezystancji oraz wystarczające do przenoszenia prądów przepływających przez układ laboratoryjny. Ponadto zastosowano rozlew masy po obu stronach płytki, w celu ograniczenia szumów mogących wpłynąć na dokładność pomiaru pojemności. Rozlew masy ma za zadanie ekranowanie ścieżek sygnałowych. Wadą tego rozwiązania   
jest zwiększona pojemność ścieżek w stosunku do masy. Warstwa miedzi została pokryta soldemaską, której zadaniem jest zabezpieczenie pól kontaktowych przed zwarciami   
oraz zanieczyszczeniami. Aby ograniczyć ilość otworów na płytce, zdecydowano o montażu powierzchniowym SMD. Wszystkie układu elektroniczne, dostępne w tym typie montażu zostały zaimplementowane. Z punktu widzenia użytkownika, ważne jest także umiejscowienie elementów, złącz diagnostycznych, aby w przejrzysty sposób korzystać z urządzenia. Wejście zasilania zostało umiejscowione, w górnym lewym rogu płytki zaraz obok znajduje   
się przełącznik zasilania. Złącza diagnostyczne natomiast jako wyjścia układu zostały umiejscowione z prawej strony płytki PCB. Wszystkie elementy bloków pomiarowych starano się umieścić możliwie blisko siebie. Zainstalowano także podstawki, aby ograniczyć miejsce styku płytki z podłożem, na którym stoi.



Rys 4.13. Projekt mozaiki PCB – górna strona.

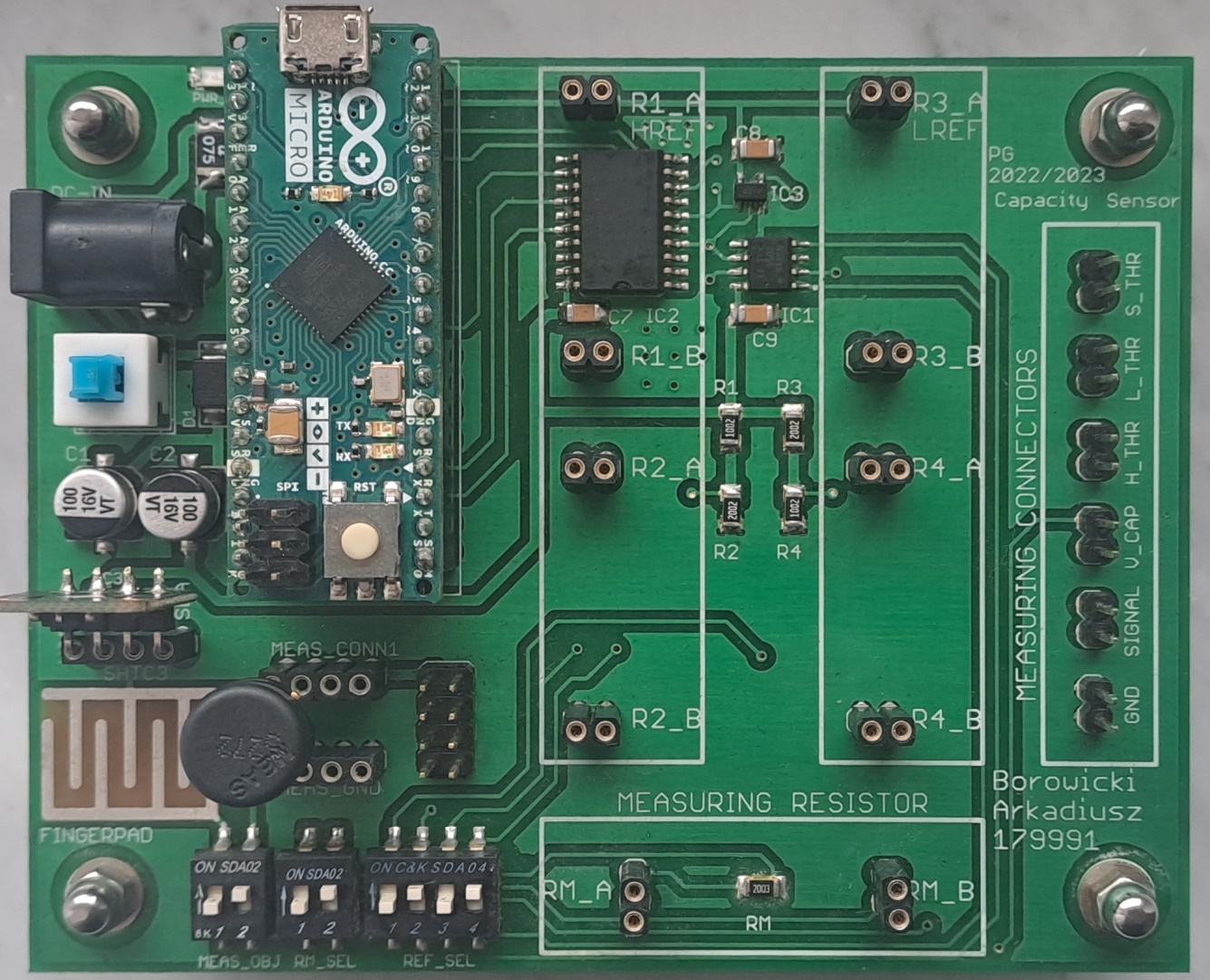


Rys 4.14. Projekt mozaiki PCB – dolna strona.

### Realizacja

Rzeczywisty układ laboratoryjny (rys 4.15) posiada nakładkę w postaci modułów Arduino Micro, czujnika temperatury i wilgotności względnej SHTC3 oraz LCD. Moduł LCD został wyprowadzony za pomocą przewodów, a kątowe złącze kołkowe umożliwiające   
jego podłączenie znajduje się pod modułem Arduino Micro. Układ laboratoryjny posiada   
także miejsce umożliwiające dołączenie czujnika pojemnościowego, co czyni ten układ uniwersalnym, mogącym pracować z różnymi czujnikami. Na rynku są dostępne   
także inne moduły służące do pomiaru wilgotności, np. czujnik pary wodnej, którego działanie opiera się o badanie pojemności, czy czujnik wilgotności gleby. Miejsce na dołączenie   
tych czujników zostało wyprowadzone w postaci męskich listew kołkowych, znajdujących   
się obok czujnika HS1101. Moduł SHTC3 umiejscowiono możliwie blisko czujnika pojemnościowego HS1101, aby jak najbardziej zbliżyć warunki pracy.

Programowanie szeregowe mikrokontrolera odbywa się poprzez dedykowane wyprowadzenie złącza ISP. Moduł posiada także wbudowane złącze Micro USB, służące   
do komunikacji z interfejsem użytkownika.



Rys 4.15. Realizacja fizyczna układu laboratoryjnego.

# Użyte Układy peryferyjne mikrokontrolera

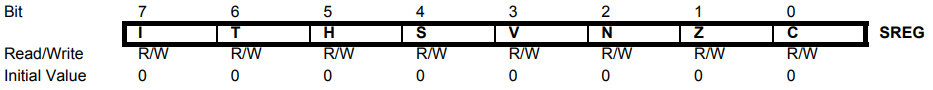
W rozdziale zostanie zaprezentowana struktura wewnętrzna mikrokontrolera ATmega32U4. Szczególną uwagę skupiono na objaśnieniu konfiguracji układów peryferyjnych, wraz z omówieniem rejestrów pracy, a także na zaletach wykorzystania interfejsu TWI.

## 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 [11]. 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 [11], 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.



Rys 5.1. Rejestr statusowy mikrokontrolera ATmega32U4 [11].

## 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. Biblioteka pozwala na konfigurację deskryptorów oraz identyfikatora, co umożliwiło zaimplementowanie automatycznej detekcji układu laboratoryjnego podłączonego do komputera, w interfejsie użytkownika.

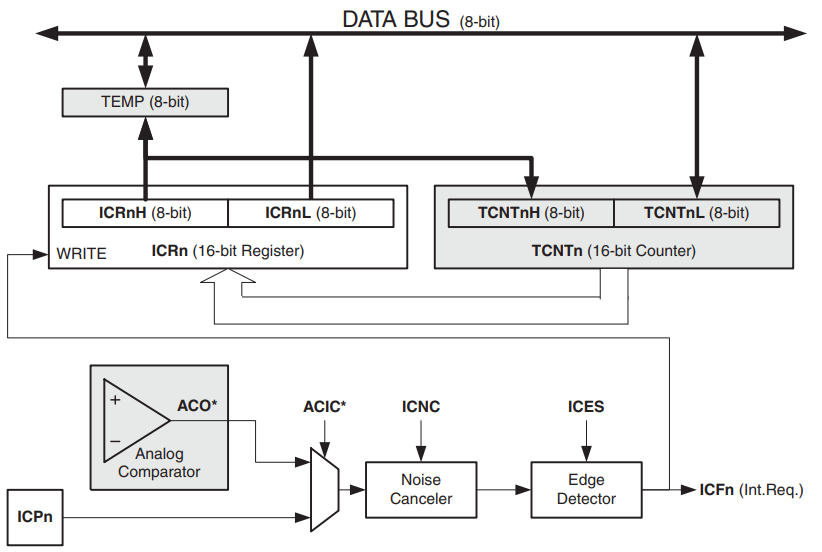
Interfejs USB umożliwia obsługę zdarzenia podłączenia do komputera,   
a także nawiązania połączenia z aplikacją. Moment, w którym mikrokontroler wykryje pojawienie się napięcia zasilania na dedykowanym wyprowadzeniu VBUS [11], równoważne   
jest podłączeniu do portu USB komputera, wywoływane jest przerwanie. 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 [11].

## ICP – Input Capture

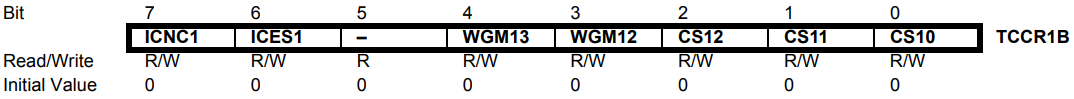
Do realizacji projektu wykorzystano 16 bitowy licznik Timer/Counter1, z wyłączonym dzielnikiem częstotliwości sygnału taktującego, aby zmaksymalizować rozdzielczość pomiaru czasu. Takowy licznik posiada możliwość pracy w trybie przechwytywania zdarzeń zewnętrznych. Realizuje on funkcję zliczania impulsów 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 [11], 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 [11].

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 [11]. Natomiast maksymalny szacowany czas ładowania i rozładowania pojemności z zadanego zakresu 100 – 300 pF został określony   
w rozdziale 3 na około 200 μs. 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) [11]. 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 wyłączonego 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 [11].



Rys 5.4. Rejestr konfiguracyjny licznika 1 [11].

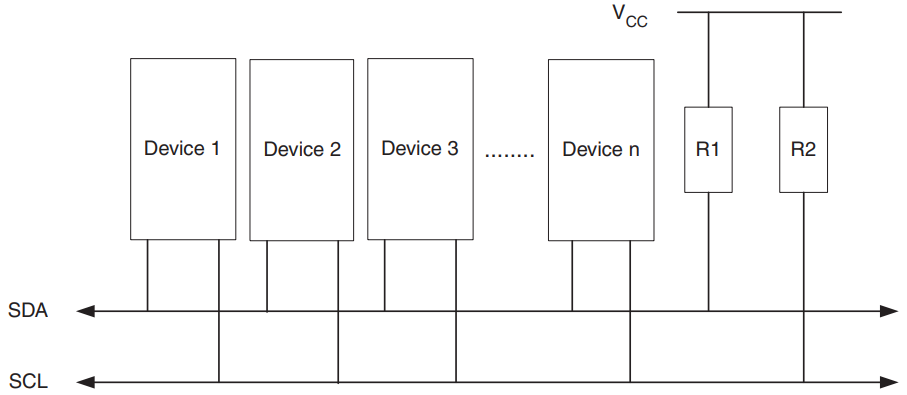
Zezwolenie na przerwanie od układu przechwytywania zdarzeń dla licznika 1 opisuje bit 5 (ICIE1 – Input Capture Interrupt Enable) w rejestrze TIMSK1 (rys 5.5). Chcąc uaktywnić przerwanie, należy ustawić powyżej wspomniany bit rejestru na wartość logiczną „1”.



Rys 5.5. Rejestr masek przerwań licznika 1 [11].

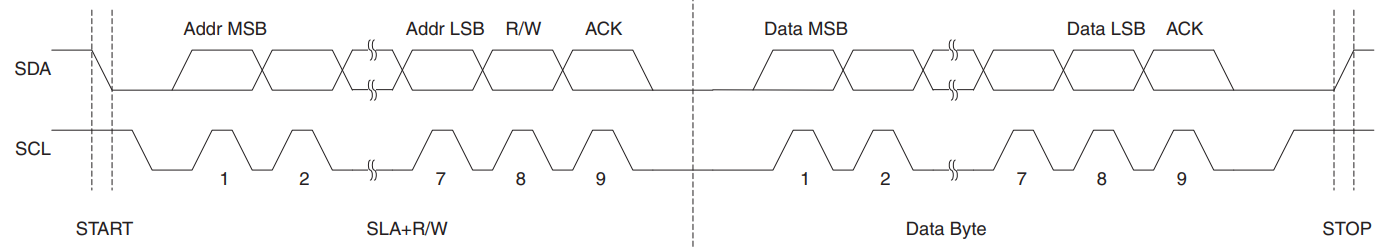
## TWI – Two Wire Interface

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 zwiera 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 bezczynności 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.



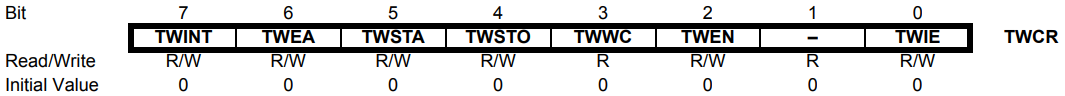
Rys 5.6. Sposób podłączenia urządzeń w interfejsie TWI [11].

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 [11].

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 [11], informujący o wystąpieniu błędu arbitrażu, czy braku potwierdzenia.



Rys 5.8. Rejestr kontrolny interfejsu TWI [11].

# Oprogramowanie mikrokontrolera

W rozdziale zostanie omówiony proces tworzenia oprogramowania na mikrokontroler ATmega32U4. Szczególną uwagę poświęcono na przedstawienie algorytmów programu, dzięki którym został stworzony kod. Zostaną omówione także najważniejsze funkcje pomiarowe, kalibracyjne i komunikacyjne.

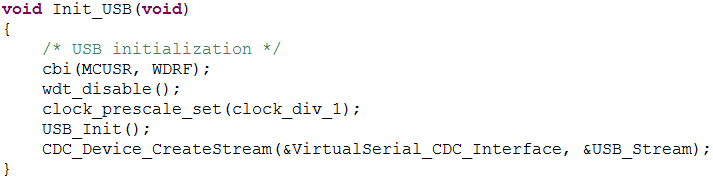
## Struktura programu

Program został napisany w języku C przy użyciu środowiska EclispeIDE z pluginem AVR [7]. Składa się z około 2500 linii kodu i zajmuje niemalże połowę pamięci programu mikrokontrolera. Wykorzystanie interfejsu USB stworzyło wymaganie pracy z wyłączonym układem sprawdzającym poprawność działania programu – WatchDog. Do obsługi interfejsu USB wykorzystano, rekomendowaną przez firmę Microchip, bibliotekę LUFA USB [18]. Biblioteka ta udostępnia szereg możliwości, np. zaprogramowanie deskryptorów,   
dzięki czemu interfejs użytkownika jest w stanie rozpoznać podłączone urządzenie w rejestrach komputera i nawiązać z nim komunikację. Do obsługi USB wymagany jest włączony system przerwań. Podczas podłączenia i konfiguracji urządzenia z komputerem wywoływane   
są określone funkcje, udostępnione dla użytkownika biblioteki LUFA. Dzięki temu zabiegowi następuje komunikacja stanu podłączenia modułu do komputera, za pomocą diod elektroluminescencyjnych umieszczonych na module Arduino Micro. Działanie interfejsu USB wymaga wywołania w pętli głównej funkcji opisanych w dokumentacji biblioteki.   
Natomiast odbiór danych obsługiwany jest poprzez wywołanie funkcji sprawdzającej   
ich dostępności w punktach końcowych USB.

## Inicjalizacja urządzenia

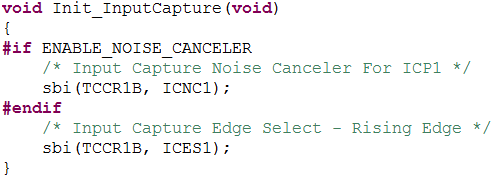
Po resecie programu, wszystkie porty I/O pracują w trybie wejścia. W pierwszej kolejności następuje ich inicjalizacja, wyłączony zostaje bufor trójstanowy, aby odizolować układ pomiarowy. Diody LED zostają wygaszone oraz konfigurowane są wewnętrzne podciągnięcia portów wejściowych do zasilania, przez wbudowane rezystory w strukturę krzemową mikrokontrolera. W ostatnim kroku, po konfiguracji stanów początkowych na portach wyjściowych, ustawiane są one w tryb wyjściowy, eliminując tym samym np. migotań diod elektroluminescencyjnych. Następnie zostaje sprawdzona obecność układów zewnętrznych, komunikujących się poprzez interfejs TWI. Po wykryciu modułu LCD generowany   
jest komunikat na wyświetlacz, informujący o działaniu programu.

Inicjalizacja USB (listing 6.1) opiera się o wyłączenie modułu WatchDog oraz wywołanie funkcji inicjalizacyjnej biblioteki LUFA [18]. Na potrzeby przesyłania danych zostaje utworzony strumień danych.



Listing 6.1. Funkcja inicjalizacji interfejsu USB.

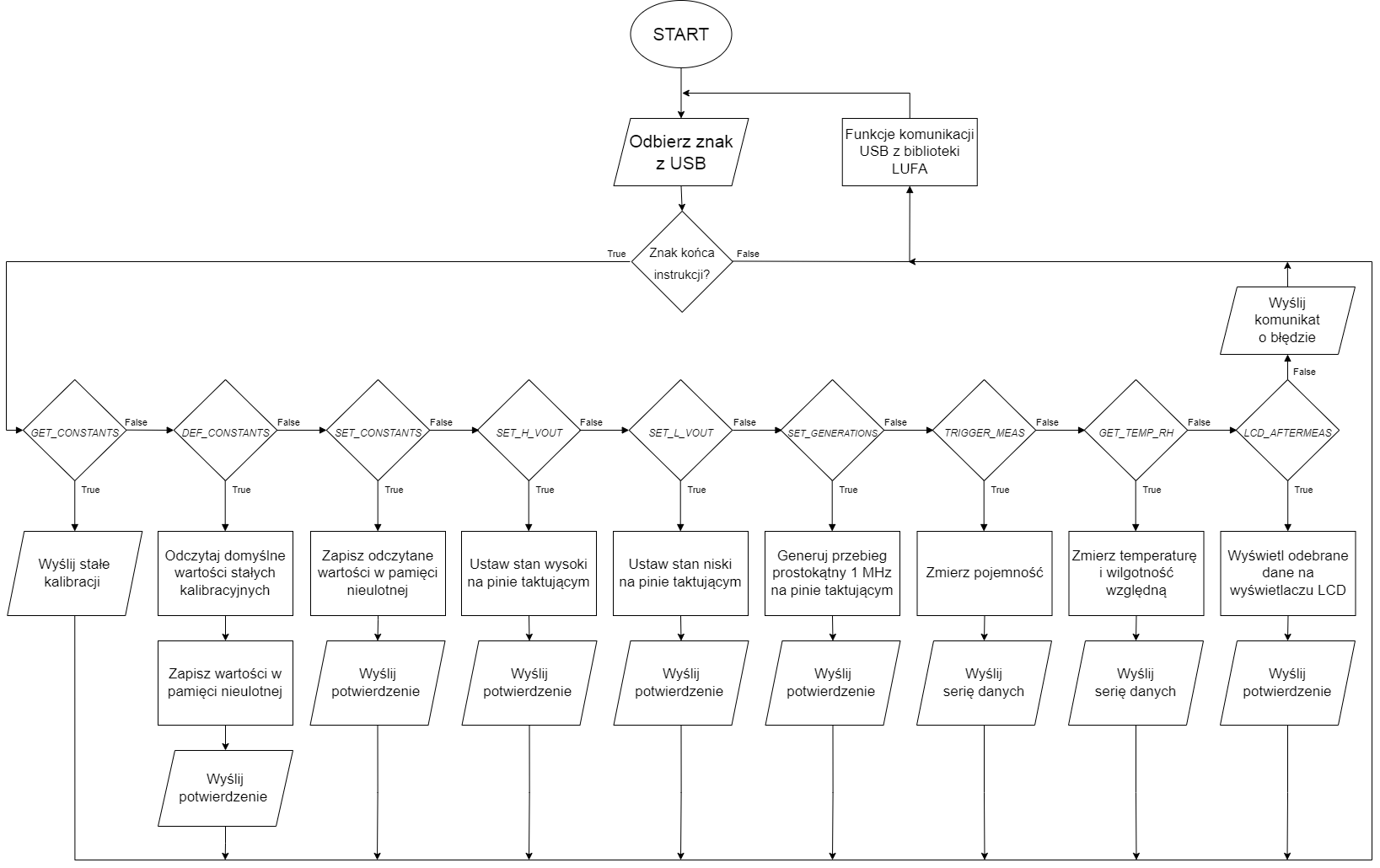
Inicjalizacja modułu przechwytywania zdarzeń zewnętrznych opiera się na wyborze zbocza (listing 6.2), które ma aktywować przerwanie i zapamiętanie aktualnego stanu licznika 1. Działanie filtru szumów zostało sparametryzowane za pomocą dyrektyw preprocesora [8],   
co umożliwia szybką konfigurację i kompilację kodu, zarówno z wykorzystaniem lub nie, filtra szumów. Po inicjalizacji, licznik nie zlicza impulsów, dołączenie zegara taktującego licznik   
jest konfigurowane podczas pomiaru pojemności, w tym samym czasie aktywowane   
jest zezwolenie na obsługę przerwania.



Listing 6.2. Funkcja inicjalizacji modułu przechwytywania .

## Pętla główna programu

Algorytm pętli głównej (rys 6.1) oparty jest o interpretację instrukcji otrzymanych  
z interfejsu użytkownika, obróbkę danych i odesłanie komunikatu potwierdzenia, serii danych bądź informacji o błędzie. Wszelkie uzyskane błędy są ukazywane użytkownikowi w postaci pojawiającego się okna z informacją. Układ laboratoryjny obsługuje 10 odmiennych instrukcji,   
w tym osobny pomiar pojemności oraz temperatury i wilgotności względnej. Możliwość zaprogramowania serii pomiarów uzyskano bezpośrednio z interfejsu użytkownika, w którym program komputerowy co wprowadzony czas wywołuje żądany pomiar od inteligentnego czujnika pojemnościowego. Z punktu widzenia układu laboratoryjnego jest to jednokrotny pomiar, dlatego przerwanie operacji nie wniesie błędów w działanie układu laboratoryjnego. Zastosowanie interfejsu USB wymusza na wywoływanie w pętli głównej programu funkcji   
z biblioteki LUFA. To ograniczenie powoduje brak możliwości uśpienia mikrokontrolera na czas bezczynności oraz wymusza programowanie w trybie MultiTaskingu (wielozadaniowości) [7].



Rys 6.1. Algorytm pętli głównej programu mikrokontrolera.

## Funkcje urządzenia

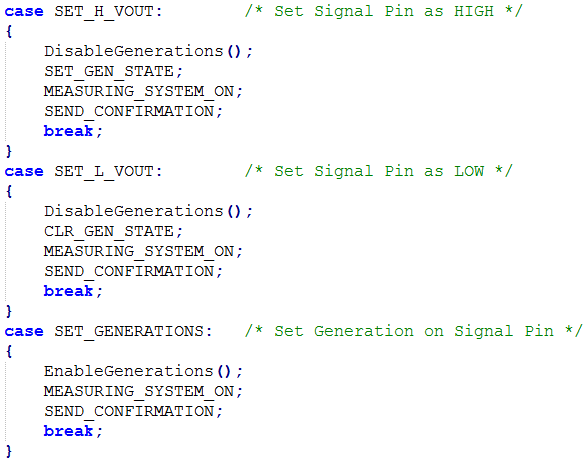
Układ laboratoryjny obsługuje 10 odrębnych instrukcji, które można podzielić na trzy obszary:

* transfer danych kalibracyjnych,
* manipulacja wyjściami, w celu kalibracji poziomów napięć oraz opóźnień,
* pomiar wielkości elektrycznych i fizycznych,

Po każdym wykonanym poleceniu, układ laboratoryjny generuje potwierdzenie wykonania instrukcji, bądź przesyła serię danych pomiarowych. Urządzenie umożliwia pomiar jedynie wartości temperatury i wilgotności względnej, z sensora cyfrowego oraz dodatkowy pomiar pojemności. Serie danych zostają zapamiętane w pamięci operacyjnej mikrokontrolera, po wykonaniu serii pomiarowych następuje formatowanie danych oraz przesyłanie do interfejsu użytkownika. Maksymalny czas pomiaru wynosi 500 ms, w przeciwnym razie urządzenie generuje komunikat błędu o przekroczeniu tej wartości.

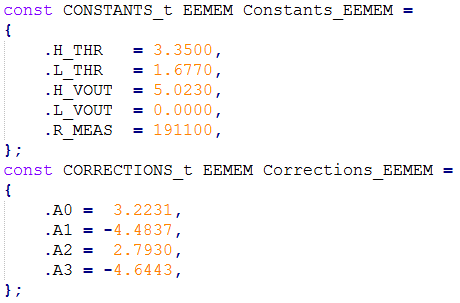
### Kalibracja

Obszar manipulacji wyjściami, w celu kalibracji poziomów napięć odpowiedzialny   
jest za obsługę trzech instrukcji (listing 6.3), ustawień obu poziomów logicznych na wyjściu bufora trójstanowego oraz generację przebiegu prostokątnego o częstotliwości 1 MHz,   
na wyprowadzeniu taktującym układ pomiarowy. Generowanie przebiegu odbywa   
się z wykorzystaniem wewnętrznego 8-bitowego licznika [8], dzięki czemu uzyskiwana   
na wyjściu częstotliwość jest dokładna.



Listing 6.3. Obsługa instrukcji kalibrujących.

Stałe wartości kalibracji, będącego podstawą do modelu matematycznego obwodu, zostały zdefiniowane jako struktury danych, które są przechowywane w nieulotnej pamięci EEPROM (listing 6.4). Po każdorazowej inicjalizacji systemu mikrokontroler pobiera   
je do pamięci operacyjnej [7]. Po interpretacji instrukcji żądania przesłania danych,   
są one formatowane i kierowane do interfejsu użytkownika. Podczas wyznaczania wartości pojemności interfejs użytkownika korzysta bezpośrednio z danych otrzymanych z układu laboratoryjnego. Użytkownik ma możliwość zmiany wartości każdego z zapisanych elementów. Potwierdzając zapis do urządzenia, interfejs generuje instrukcję żądania nadpisania stałych wartości kalibracji pamięci nieulotnej EEPROM.



Listing 6.4. Definicja domyślnych wartości struktur danych kalibracyjnych.

### Pomiar temperatury i wilgotności względnej

Temperatura i wilgotność względna jest mierzona za pomocą cyfrowego czujnika SHTC3. Komunikacja z czujnikiem odbywa się poprzez interfejs TWI. Zaletą jaka przeważyła   
na wyborze tego podzespołu jest krótki czas pomiaru (15 ms) przy zapewnieniu wystarczającej dokładności wskazań ±2 % RH oraz ±0.2 °C [13]. Dodatkowo element posiada małe wymiary,   
co czyni możliwym, umiejscowienie go blisko pojemnościowego sensora HS1101, tym samym lepiej odzwierciedli warunki panujące wokół badanego czujnika. Urządzenie charakteryzuje także niski pobór prądu podczas pomiaru, który wynosi 900 µA [13]. Sensor także pracuje   
na podwyższonej częstotliwości pracy interfejsu TWI (400 kHz).

Sam pomiar sprowadza się do inicjalizacji sensora, wysyłając instrukcje rozpoczynającą pomiar przez interfejs TWI. Po czasie 15 ms mikrokontroler wywołuje odczyt danych   
z cyfrowego czujnika SHTC3. Transfer wyznaczonych wartości temperatury i wilgotności poparty jest sumą kontrolną, która wewnątrz programu mikrokontrolera zostaje przeanalizowana. Operacja ta znacząco ogranicza możliwości błędnych wskazań mierzonych wartości.

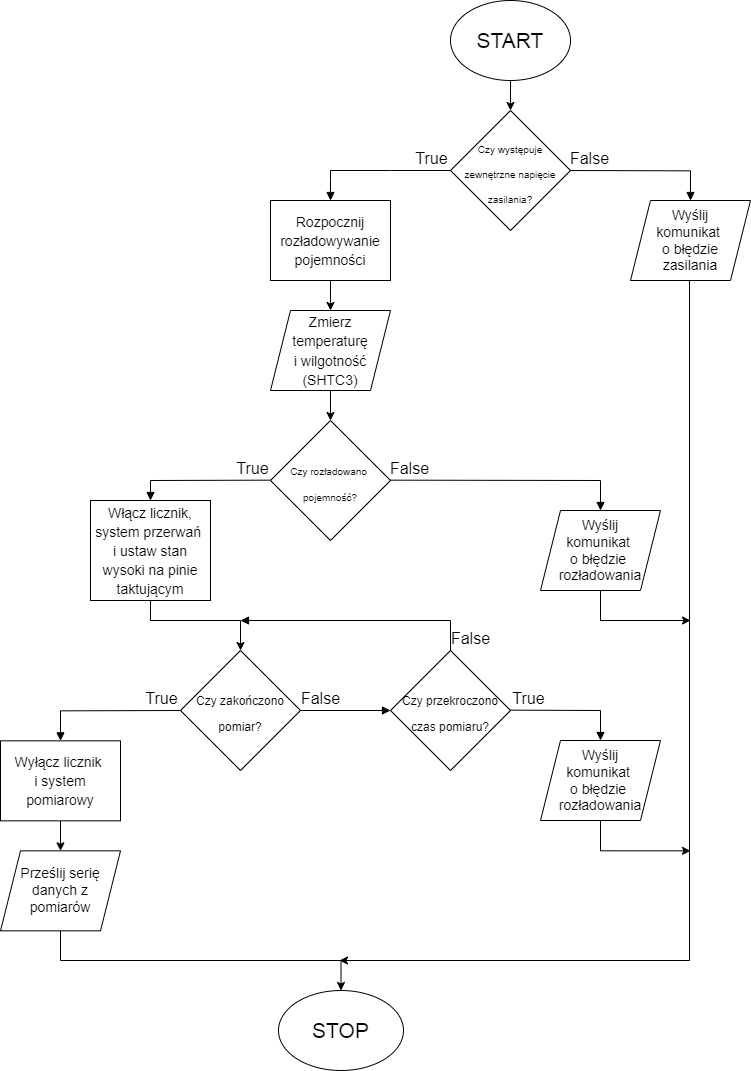
### Pomiar pojemności

Najważniejszym celem realizacji projektu jest pomiar pojemności, który opiera   
się o jak najdokładniejsze zmierzenie czasów ładowania i rozładowania energii gromadzącej   
się w obiekcie badanym. Odebranie instrukcji aktywującej pomiar, w pierwszej kolejności sprawdza obecność zewnętrznego napięcia zasilania (rys 6.2), ponieważ podłączenie urządzenia do portu USB spowoduje uruchomienie programu mikrokontrolera, dostarczając   
z portu zasilanie. W przypadku braku zewnętrznego zasilacza, układ laboratoryjny informuje   
o tym interfejs użytkownika, przerywając przy tym wykonywanie instrukcji. W następnym kroku, układ rozpoczyna rozładowywanie pojemności badanej, poprzez aktywację obwodu pomiarowego i wystawienie stanu niskiego na wyprowadzeniu taktującym. Rozpoczyna   
się pomiar temperatury i wilgotności względnej, z wykorzystaniem czujnika cyfrowego SHTC3.

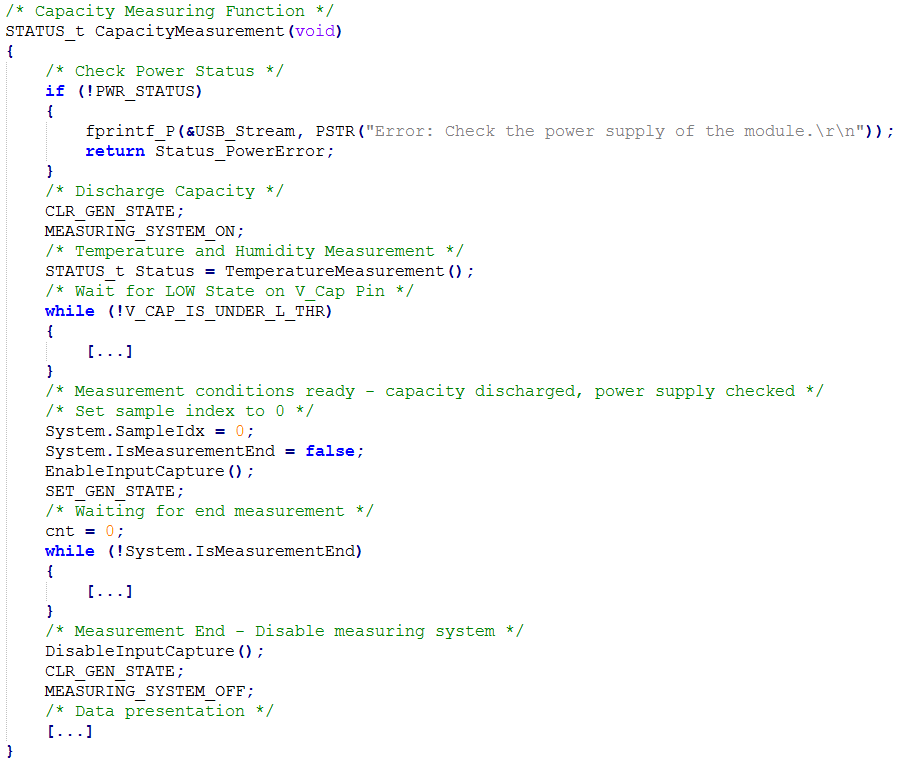
Gdy poziom ładunku zgromadzonego przez badaną pojemność osiągnie wartość napięcia poniżej dolnego progu referencyjnego, dojdzie do inicjalizacji modułu przechwytywania zdarzeń zewnętrznych oraz systemu przerwań. Program główny (listing 6.5) oczekuje   
na ustawienie flagi zakończenia serii pomiarowej przez przerwanie. W pętli sprawdzającej zakończenie serii pomiarowej, następuje sprawdzenie okresu jego trwania. Przekroczenie progu powoduje anulowanie dotychczasowych wyników oraz wygenerowanie komunikatu   
do interfejsu użytkownika, informującego o nieprawidłowościach na drodze serii pomiarowej.

Obsługa przerwania (listing 6.6) sprowadza się do zapamiętania w buforze danych, wartości rejestru (ICR1) przechwyconego przez moduł Input Capture [8]. Wartość obecnego stanu licznika 1 zostaje wyzerowana. Powoduje to, że podczas transferu danych do interfejsu użytkownika istnieje możliwość interpretacji liczbowej kolejnych wartości bez konieczności wykonywania obliczeń matematycznych. W kolejnej instrukcji następuje sprawdzenie liczby zarejestrowanych pomiarów. Przekroczenie granicznej wartości powoduje ustawienie flagi zakończenia, którą program główny zinterpretuje, zaraz po wyjściu z przerwania.   
Przed zakończeniem obsługi przerwania następuje także zmiana stanu na wyjściu bufora trójstanowego, taktującego obwód pomiarowy, aby odwrócić stan ładowania / rozładowania badanego obiektu.

Zakończenie pomiarów, zinterpretowane przez program główny, w pierwszej kolejności deaktywuje system przerwań oraz moduł przechwytywania zdarzeń zewnętrznych. Obwód pomiarowy zostaje odłączony od zasilania, poprzez przejście bufora trójstanowego w stan wysokiej impedancji. Ostatecznie następuje formatowanie danych i ich transfer do interfejsu użytkownika.

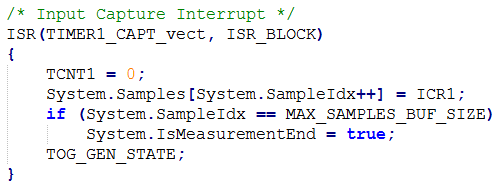


Rys 6.2. Algorytm prezentujący pomiar pojemności.



Listing 6.5. Funkcja pomiaru pojemności.

Pomimo wysokiej optymalizacji kompilatora, wygenerowany kod języka assembler, posiada szereg zbędnych instrukcji wewnątrz przerwania. Przewagą oprogramowania niskopoziomowego, w tym przypadku, okazałoby się znaczne skrócenie kodu, a co za tym idzie, czasu opóźnienia jakie wprowadza. Będzie to celem rozwojowym prac nad projektem.  
Obecne zajmowana pamięć przerwania to 100 bajtów, czas opóźnienia jakie generuje   
jego wykonanie wynosi około 6 μs.



Listing 6.6. Obsługa przerwania modułu przechwytywania zdarzeń zewnętrznych.

# Interfejs użytkownika na komputerze PC

Interfejs użytkownika jest jednym z najważniejszych elementów projektu, zapewnia komunikację z układem laboratoryjnym, wykonuje obliczenia i prezentuje dane. W rozdziale zostanie zaprezentowana realizacja interfejsu użytkownika. Szczegółową uwagę poświęcono na omówienie funkcji matematycznych, korekcji charakterystyki oraz generacji skryptów Matlab.

Interfejs użytkownika został zrealizowany w języku C# z biblioteką WindowsForms [9]. Kod składa się z około 3500 linii. Program zapewnia komunikację z urządzeniem laboratoryjnym, wykreśla charakterystyki przejściowe z zaprogramowanych serii pomiarowych, generując skrypt Matlab pozwalający na obróbkę danych przez użytkownika systemu. Prowadzony jest także szczegółowy dziennik zdarzeń, umożliwiający zapoznanie   
się użytkownikowi z działaniem systemu.

## Strona startowa

Po uruchomieniu interfejsu użytkownika (rys 7.1) ukazują się najważniejsze informacje dotyczące osób odpowiedzialnych za projekt. W dolnej części aplikacji okienkowej widnieje informacja o statusie połączenia z układem laboratoryjnym, pasek informacyjny jest widoczny   
z poziomu każdego okna. Prócz statusu widnieje także informacja o ostatnim zdarzeniu   
w systemie. Z poziomu okna istnieje możliwość przejścia do ustawień ogólnych, kalibracji   
czy pomiarów, które dzięki przyjaznemu interfejsowi są intuicyjne podczas korzystania   
z systemu.



Rys 7.1. Strona startowa interfejsu użytkownika.

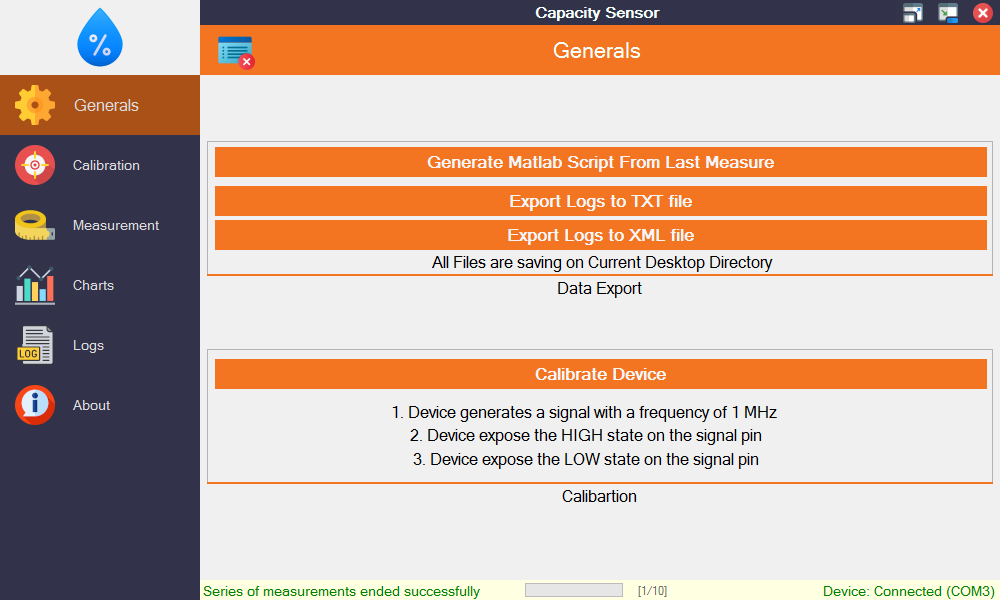
## Ustawienia ogólne

Z poziomu okna ustawień ogólnych (rys 7.2) istnieje możliwość kalibracji urządzenia, która realizowana jest w trzech krokach,

* na wyprowadzeniu taktującym obwód RC, generowany jest przebieg prostokątny   
  o częstotliwości 1 MHz,
* wyprowadzenie taktujące obwód pomiarowy przyjmuje stan wysoki,
* wyprowadzenie taktujące obwód pomiarowy przyjmuje stan niski.

Zastosowanie trzech kroków pozwala na zmierzenie poziomów napięć wyjściowych   
z bufora trójstanowego w obu stanach, które może się zmieniać np. pod wpływem zmian temperatury otoczenia. Zmierzone wartości następnie należy wprowadzić do interfejsu użytkownika w oknie kalibracji. Natomiast przy pomocy generowanego sygnału 1 MHz,   
możliwe jest podejrzenie przebiegu sondą oscyloskopową i określenie opóźnień wprowadzanych przez układ. Pozwala to także na oszacowanie pojemności pasożytniczych obecnych w układzie, które będą wpływały na rozmywanie się zbocz sygnału generowanego.

Oprócz kalibracji, interfejs umożliwia wyeksportowanie danych pomiarowych w postaci skryptu Matlab oraz eksportowanie dziennika zdarzeń w postaci pliku tekstowego lub XML [9]. Utworzone pliki zostają zapisane na pulpicie komputera i są otwierane przez domyślnie wybrany program, zaraz po ich zapisaniu.



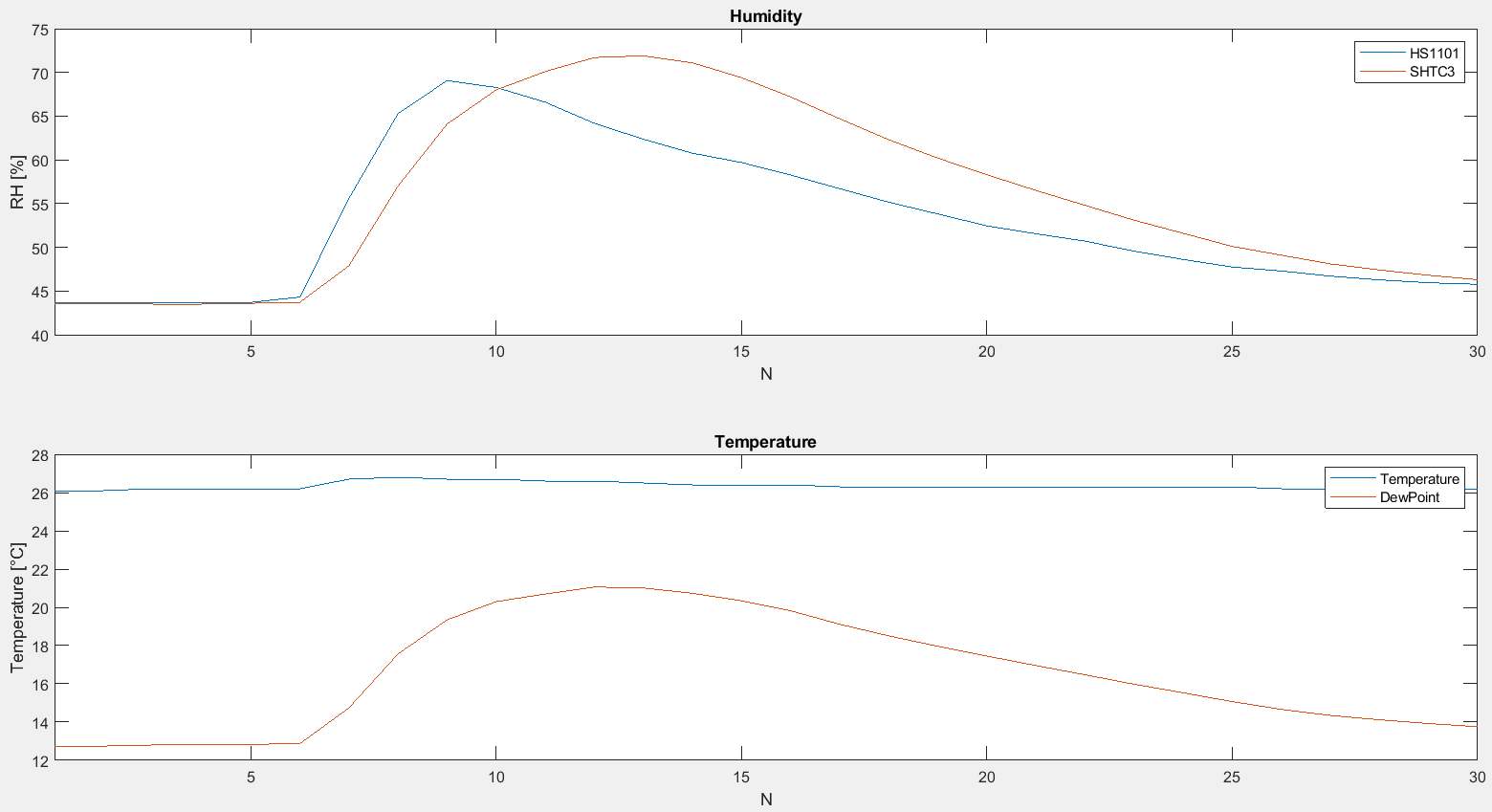
Rys 7.2. Ustawienia ogólne interfejsu użytkownika.

### Eksport wyników pomiarowych do programu Matlab

Skrypt Matlab generuje charakterystyki czasu ładowania oraz rozładowania,   
w zależności od pojemności z zakresu od 100 do 300 pF, ze stałą wartością rezystancji pomiarowej. Zobrazowana została także charakterystyka czasu ładowania i rozładowania pojemności badanej dla wartości rezystancji z zakresu od 100 kΩ do 1 MΩ. Wygenerowane charakterystyki pozwalają zobrazować sensowność pomiaru przy podanych wartościach rezystancji oraz mierzonej pojemności, ponieważ zbyt mała rezystancja będzie prowadziła   
do krótkich czasów pomiarowych, co będzie skutkowało nadmiarowym ładowaniem pojemności ponad skonfigurowane napięcie progowe, to zjawisko wywołane jest opóźnieniem obsługi przerwania.

Skrypt wyznacza histogram pomiarów podczas wykonywanych serii pomiarowych. Odpowiednia duża liczba wyników powinna tworzyć rozkład Gaussa, co zaprezentowano   
w dalszej części pracy. Histogram pozwala statystycznie ocenić użytkownikowi czy pomiar został wykonany z należytą precyzją, ocenić to można poprzez szerokość rozkładu normalnego. Zostają wyznaczone także charakterystyki błędów losowych dla czasów ładowania   
i rozładowania badanej pojemności, które informują o wystąpieniu nieprzewidzianego zakłócenia spowodowanego np. źródłem zewnętrznym. Powtarzany błąd losowy   
przy każdym pomiarze informuje użytkownika systemu o wystąpieniu błędu systematycznego,   
który występuje z powodu niedoskonałości układu laboratoryjnego.

Wyznaczony także zostaje charakterystyka wilgotności względnej, zmierzonej   
za pomocą czujnika pojemnościowego HS1101 oraz cyfrowego SHTC3 (rys 7.3). Użytkownik ma możliwość określenia poziomu kalibracji układu laboratoryjnego oraz doświadczalnego sprawdzenia bezwładności i pojemności cieplnej obu podzespołów.

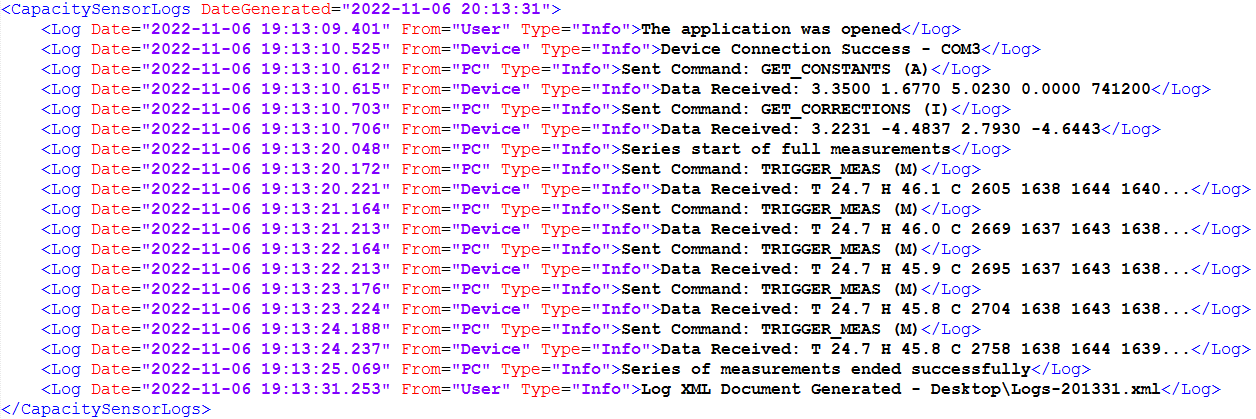


Rys 7.3. Przykład charakterystyki wilgotności i temperatury w czasie.

### Eksport dziennika zdarzeń

W przypadku dużej liczby pomiarów, wygenerowany plik XML umożliwia prezentację danych ze wszystkich wykonanych pomiarów w ciągu całej sesji. Na przykład generując dokument XSLT przetwarzający plik XML (listing 7.1), można ukazać sformatowane dane   
w przeglądarce internetowej. Obecne przeglądarki interpretują instrukcję języka JavaScript, umożliwiając nie ograniczone prezentowanie danych, w przejrzysty dla użytkownika sposób. Funkcja nie została zaimplementowana na potrzeby tego projektu lecz będzie jednym z celów jego rozwoju.

Format tekstowy XML nie jest przejrzysty dla użytkownika, dlatego zdecydowano również na eksport danych w formacie tekstowym, aby umożliwić ewentualną kopię danych pomiarowych z całej sesji.



Listing 7.1. Przykład eksportu dziennika zdarzeń w formacie XML.

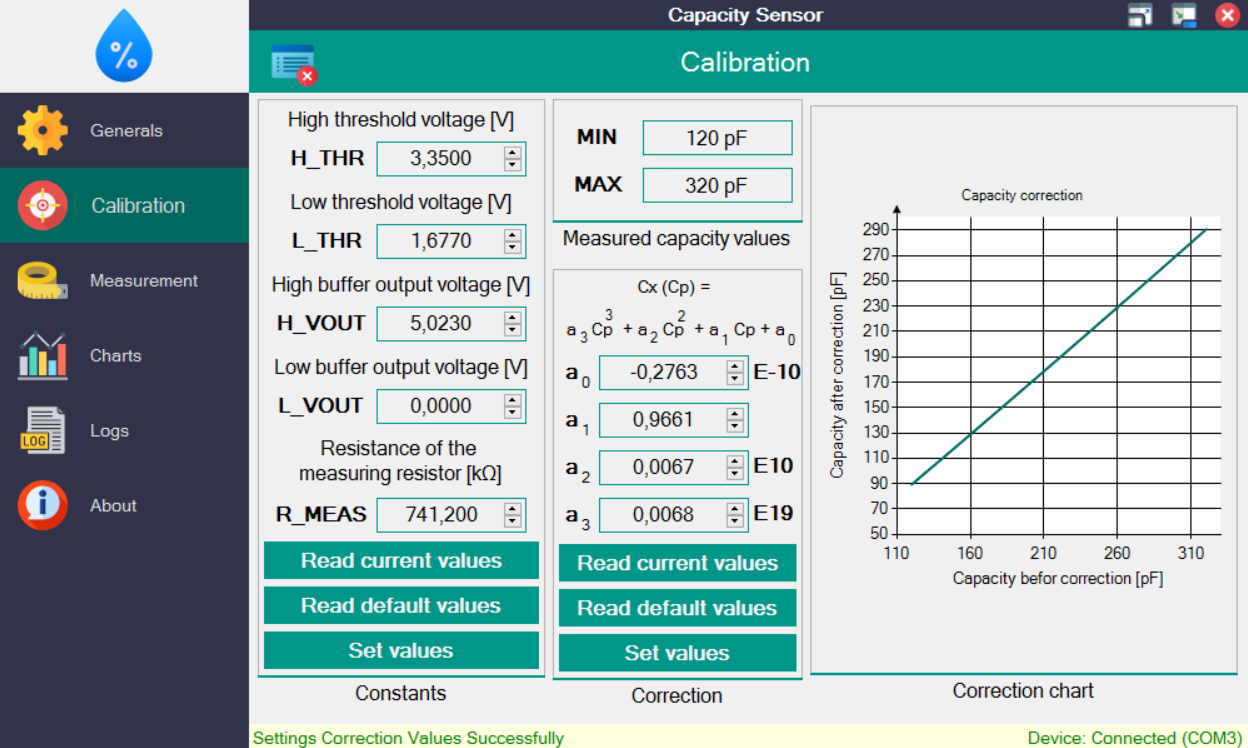
## Kalibracja

Kalibracja urządzenia w przypadku pomiaru wielkości rzędu pF jest jednym   
z kluczowych elementów wpływających na dokładność pomiarową. Zmiana temperatury   
czy wilgotności bezpośrednio wpływa na stabilizowane napięcie układu 7805, czy napięcie wyjściowe z bufora trójstanowego. Również zmiana otoczenia, w którym występują zakłócenia elektromagnetyczne będzie wpływała na dokładność pomiarów, np. zaindukowane napięcie   
na linii połączonej z badaną pojemnością może zostać zinterpretowane przez komparator   
jako wystąpienie zdarzenia, co w efekcie będzie powodowało błędne wywołanie przerwania. Zrealizowany model układu laboratoryjnego nie został izolowany od takich zjawisk. Wszelkie wartości możliwe do zmiany ustawień są zapisywane w pamięci nieulotnej EEPROM mikrokontrolera znajdującego się w układzie laboratoryjnym. Pamiętanie ustawień jest pomocne z punktu widzenia użytkownika, raz stworzona konfiguracja, dla konkretnego urządzenia pomiarowego, zostanie zapamiętana po wyłączeniu zasilania i odtworzona po inicjalizacji systemu, co nie zwalnia z każdorazowej kalibracji urządzenia.

Wartości kalibracji są źródłem danych dla obliczeń matematycznych. Dane kalibracyjne, określone za pomocą wzoru 3.4 stanowią:

* napięcia referencyjne (H\_THR, L\_THR),
* napięcia wyjściowe bufora w stanie niskim i wysokim (H\_VOUT, L\_VOUT),
* rezystancję rezystora pomiarowego (R\_MEAS),
* współczynniki korekcji charakterystyki pojemnościowej (a0 – a3).

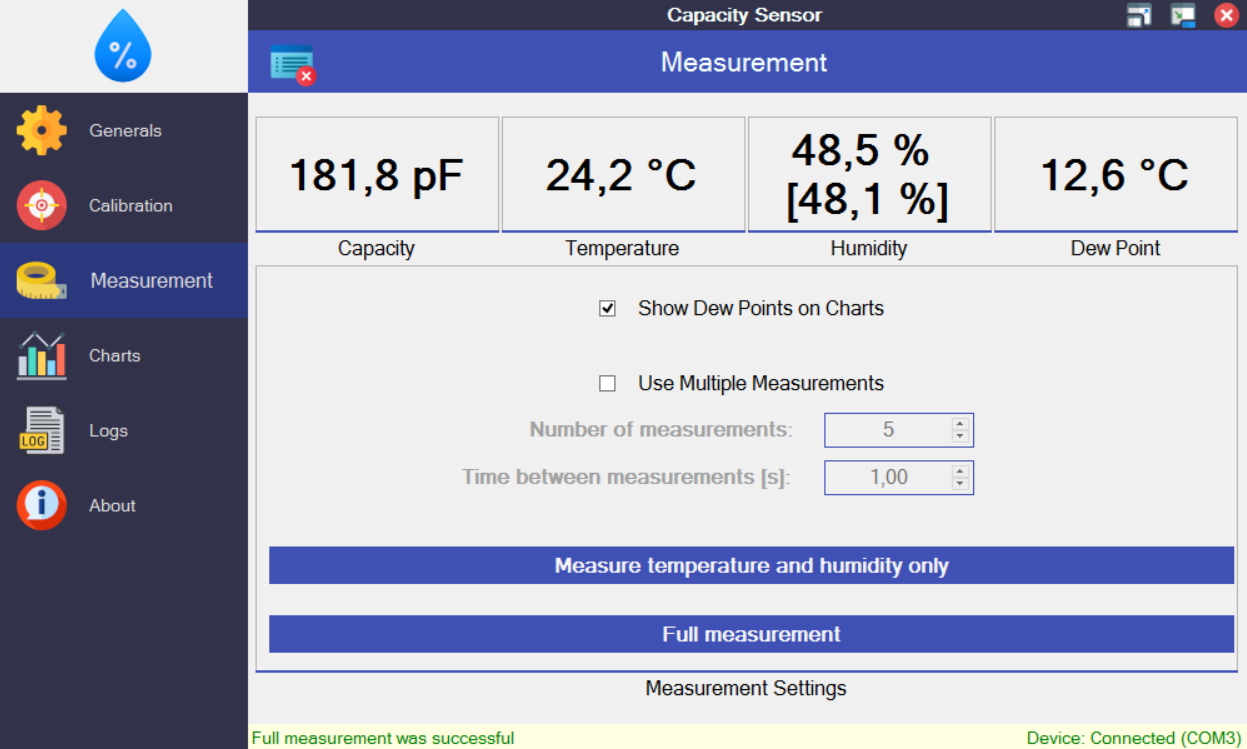
Dodatkowo z ustawień współczynników korekcji generowany jest wykres, którego celem jest zobrazowanie jakie wartości przyjmą pojemności zmierzone z zakresu 120 – 320 pF.



Rys 7.4. Kalibracja urządzenia z poziomu interfejsu użytkownika.

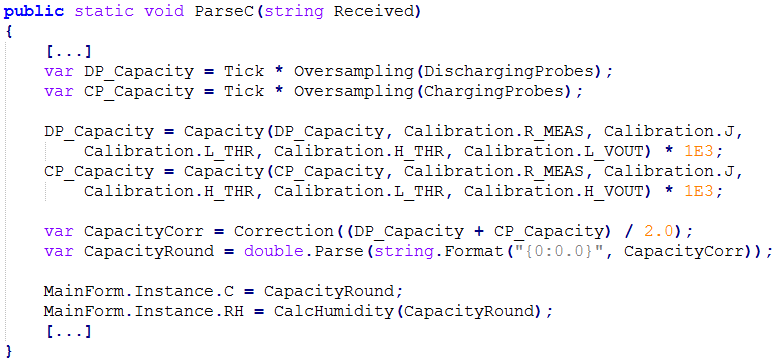
## Funkcje pomiarowe

Pomiar pojemności może odbywać się w jednym z dwóch trybów (rys 7.5) – pojedynczego pomiaru oraz serii pomiarowej, dla której generowany jest wykres. Wielkość wykresu zależy od ilość punktów pomiarowych, które użytkownik systemu definiuje. Sparametryzowany został także odstęp czasowy pomiędzy pomiarami. Minimalną wartość odstępu do zarejestrowania pomiaru wynosi 500 ms. Dodatkowo w oknie widnieją wyniki dotyczące ostatniego pomiaru – wyświetlana jest zmierzona pojemność czujnika, temperatura otoczenia, temperatura punktu rosy oraz wskazania wilgotności względnej przez czujnik SHTC3 oraz wyznaczone drogą obliczeń na podstawie znanej pojemności czujnika. Ta druga znajduje się w nawiasie kwadratowym.



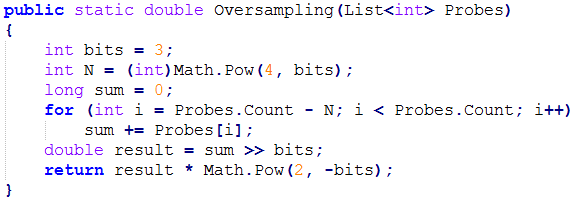
Rys 7.5. Wywołanie pomiarów z poziomu interfejsu użytkownika.

Wyznaczenie wartości pojemności badanej z danych pomiarowych (listing 7.2) sprowadza się do podzielenia kolejnych próbek czasu na pochodzące od ładowania   
oraz od rozładowania. W następnej kolejności na obu zbiorach wprowadza się nad próbkowanie i decymacje, które przebiegają na danych reprezentujących liczbę taktów zegara. Przejście  
 na dziedzinę czasu realizowane jest mnożeniem przez okresu jednego cyklu zegarowego. Otrzymane dane pozwalają w następnym kroku na obliczenie wartości pojemności. Pojemność wynikowa otrzymywana jest poprzez korekcję charakterystyki, średniej pojemności, otrzymanych za przy użyciu czasów ładowania i rozładowania.



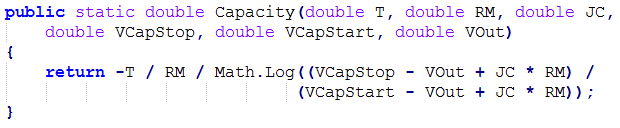
Listing 7.2. Funkcja wyznaczająca pojemność z danych pomiarowych.

W celu poprawy dokładności pomiarowej zostaje zwiększona reprezentacja bitowa wyników pomiarowych. Aby uzyskać o jeden bit większą reprezentację liczbową należy próbkować sygnał czterokrotnie. Zwiększenie o N bitów wymaga dostarczenia algorytmowi 4N próbek sygnału (listing 7.3). Wewnątrz programu mikrokontrolera zdefiniowano liczbę pomiarów na 128, tzn. 64 próbki ładowania oraz 64 rozładowania. Wykonanie takiej serii pozwala   
na zwiększenie reprezentacji liczbowej o 3 bity. Zatem zamiast reprezentacji próbki w zakresie   
16 bitów (0 – 65535), uzyskano 19 bitów (0 – 524287). Kolejną z zalet operacji nadpróbkowania jest uśrednianie serii wyników pomiarowych. Znacząco zmniejsza to wartość błędów losowych. Sam algorytm nadpróbkowania i decymacji oparty jest o wyznaczenie sumy wartości próbek pomiarowych i następnym przesunięciu bitowym wyniku, o liczbę zwiększanych bitów.



Listing 7.3. Funkcja realizująca nadpróbkowanie i decymację.

Jedna z głównych funkcji pomiarowych dotyczy wyznaczenia wartości pojemności badanej, na podstawie otrzymanych czasów ładowania i rozładownia (listing 7.4). Funkcja realizuje wzór 3.4 – uwzględniając jedynie idealny obwód pomiarowy, dlatego konieczna   
jest późniejsza korekcja charakterystyki wielomianem 3. stopnia. Metoda ta zawiera listę parametrów, będących podstawą kalibracji urządzenia. Wyznaczanie wartości pojemności   
w zależności od czasu ładowania lub rozładowania, różnią się podstawieniem parametrów napięć: początkowego, końcowego oraz wyjściowego z bufora trójstanowego. Wartość pojemności zostaje obliczona na podstawie nadpróbkowanych serii pomiarowych czasów ładowania i rozładowania badanego obiektu. Współczynniki wielomianu korygującego, zostały wyznaczone doświadczalnie, na podstawie pomiaru znanych, wzorcowych wartości pojemności.



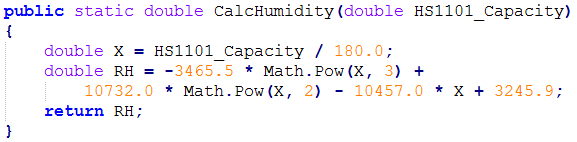
Listing 7.4. Funkcja obliczająca pojemność.

Producent HS1101 określa, że charakterystyka pojemności w zależności od wilgotności względnej, nie przebiega w sposób liniowy [14]. Wzór konwersji został zasięgnięty   
wprost z dokumentacji i stanowi odwrotny wielomian odpowiedzi czujnika pojemnościowego   
na zmiany wilgotności względnej otoczenia. Wzór 7.1 zostaje zrealizowany za pomocą funkcji, wewnątrz interfejsu użytkownika (listing 7.5).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7.1) |
|  | (7.2) |

gdzie:

* RH – wilgotność względna [%],
* Czmierzone – zmierzona wartość pojemności [pF],
* Ctypowe – typowa wartość pojemności czujnika dla RH = 55% – 180 pF [14].



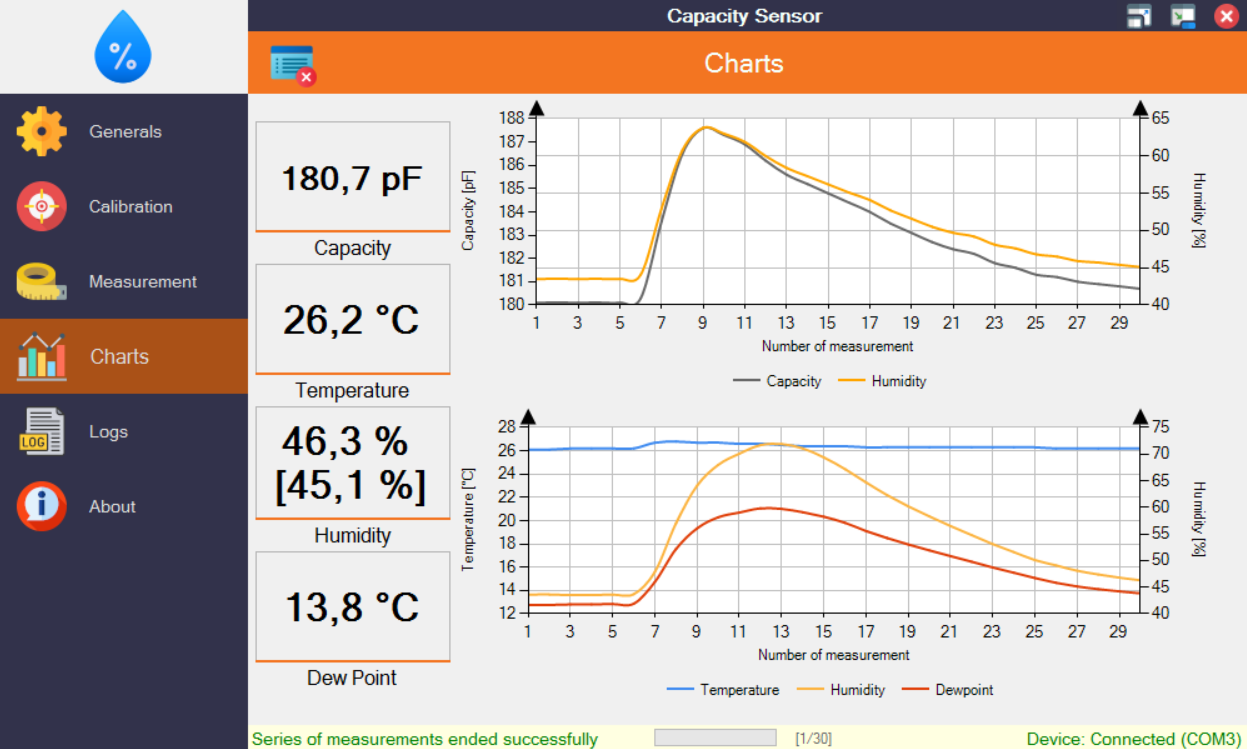
Listing 7.5. Funkcja obliczająca wilgotność względną na podstawie pojemności czujnika.

## Charakterystyki pomiarów

Prezentacja danych w czasie rzeczywistym jest ogromną zaletą systemu. Możliwość zaprogramowania serii pomiarów, co zadany, ściśle określony czas pozwala na rejestrację temperatury i wilgotności względnej otoczenia, w długim okresie, bez potrzeby ciągłego wyzwalania pomiaru przez użytkownika. Interfejs użytkownika rejestruje (rys 7.6):

* zmierzoną pojemność,
* wilgotność względną, na podstawie pojemności czujnika HS1101,
* temperaturę i wilgotność względną otoczenia, z wykorzystaniem sensora SHTC3,
* temperaturę punktu rosy, wyznaczoną na podstawie temperatury i wilgotności.

Ponadto, wygenerowany skrypt Matlab, umożliwia dodatkową prezentację histogramu wskazań pojemności, w czasie pomiaru oraz charakterystykę błędów losowych. Użytkownik systemu posiada również możliwość ukrycia charakterystyki temperatury punktu rosy,   
dzięki czemu wykres temperatury otoczenia staje się czytelniejszy.



Rys 7.6. Podgląd charakterystyk w interfejsie użytkownika.

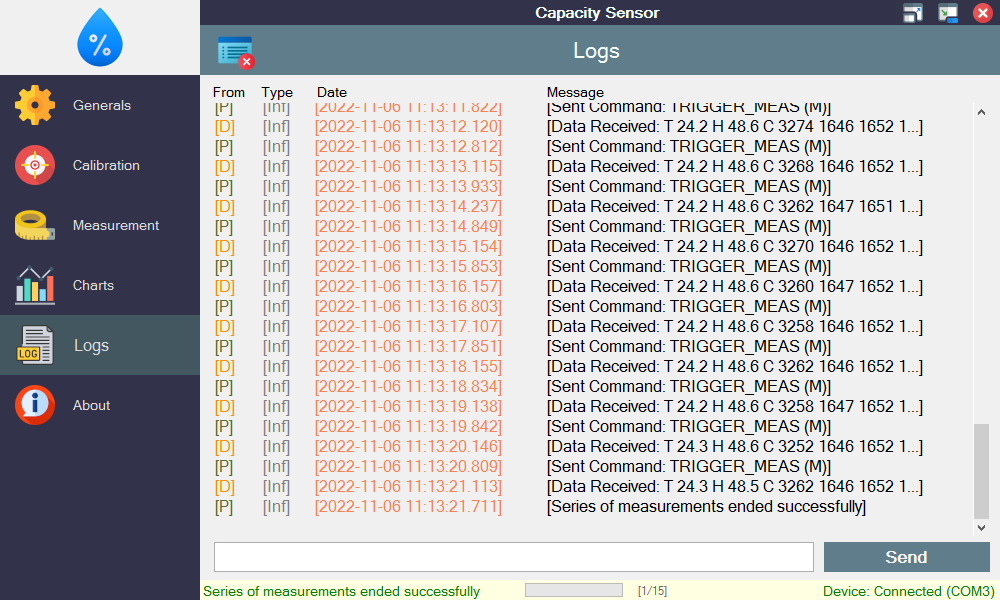
Wygenerowane charakterystyki przejściowe pozwalają porównać pojemność właściwą oraz czas odpowiedzi wykorzystanych sensorów. Zachowanie obu czujników przy powolnych zmianach wilgotności prowadzi do zbliżonych rezultatów wartości wilgotności. Nagłe zmiany, spowodowane np. podmuchem wilgotnego powietrza, wyłonią różnicę polegające na różnych właściwościach cieplnych, pojemnościach własnych, stałych czasowych odpowiedzi, wielkości obudowy itp.

## Dziennik zdarzeń

Ważnym elementem diagnostycznym działania systemu jest rejestracja zdarzeń, zarówno z punktu widzenia programistycznego jak i użytkowego. Natychmiastowe informacje   
o błędach oraz wewnętrznych zdarzeniach systemu, pojawiające się na pasku statusowym,   
w dolnej części okna pozwalają na ocenę działania systemu, bez konieczności przełączania widoków interfejsu.

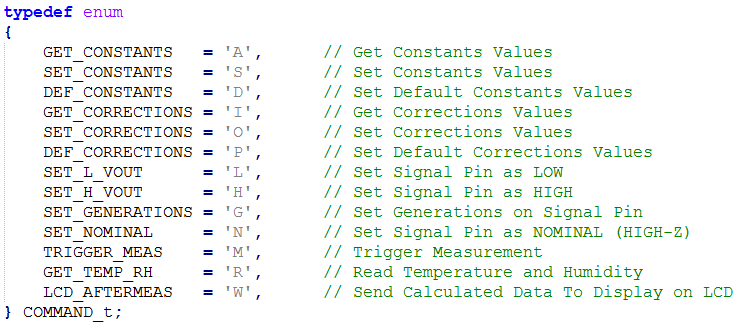
Dziennik zdarzeń (rys 7.7) informuje użytkownika systemu o sytuacjach, jakie zaszły   
w czasie sesji pomiarowej. Interfejs zachowuje czas wystąpienia wydarzeń, z dokładnością   
do pojedynczych ms. Zapisywany jest również jego rodzaj i pochodzenie. W interfejsie   
odróżnienie błędów sygnalizowane jest kolorystycznie.

Z poziomu ustawień ogólnych istnieje możliwość wyeksportowania danych w formacie tekstowym jak i XML. Z poziomu dziennika zdarzeń użytkownik może wynieść informacje   
na temat obsługiwanych instrukcji.



Rys 7.7. Dziennik zdarzeń interfejsu użytkownika.

Dodatkową, zaimplementowaną cechą jest terminal do urządzenia. Użytkownik   
z poziomu interfejsu ma możliwość wysłania dowolnej instrukcji (listing 7.6). Jest to dydaktyczny element, pozwalający nowym użytkownikom systemu na zapoznanie się z działaniem układu laboratoryjnego. Terminal pozwala jedynie na przesyłanie danych pomiędzy urządzeniami, zatem nie ma możliwości np. wywołania funkcji pomiaru pojemności, czy generacji skryptu Matlab.



Listing 7.6. Zestaw instrukcji interpretowanych przez układ laboratoryjny.

# Weryfikacja eksperymentalna

W rozdziale zostanie zaprezentowany proces kalibracji urządzenia pomiarowego. Zostaną wyznaczone charakterystyki rzeczywiste układu pomiarowego. Szczególną uwagę poświęcono na omówieniu błędów, wynikających z nieidealności obwodu pomiarowego   
oraz wyznaczeniu charakterystyki korygującej pomiar pojemności.

## Stanowisko pomiarowe

Stanowisko pomiarowe (rys 8.1) opiera się na pomiarze charakterystyk rzeczywistego układu laboratoryjnego. W tym celu przeprowadzono szereg pomiarów z wykorzystaniem pojemności wzorcowych oraz rezystancji. Uzyskane wyniki pozwoliły na korekcję charakterystyki, z dokładnie wyznaczonymi współczynnikami. Porównano współczynniki otrzymane drogą regresji liniowej oraz interpolacji Lagrange’a 4 stopnia.



Rys 8.1. Diagram stanowiska pomiarowego.

Zastosowanie laboratoryjnego oscyloskopu RIGO DS1053E pozwala zaobserwować charakterystykę przejściową podczas przeprowadzania badania. Pomaga doświadczalnie określić opóźnienie, jakie jest wprowadzane przez system przerwań mikrokontrolera. Podłączenie sondy oscyloskopowej zachodzi z wykorzystaniem złącz diagnostycznych. Podczas tego procesu warto pamiętać o zastosowaniu trybu „x10” sondy oscyloskopowej,   
co znacząco zmniejszy pojemności wprowadzane do obwodu pomiarowego.

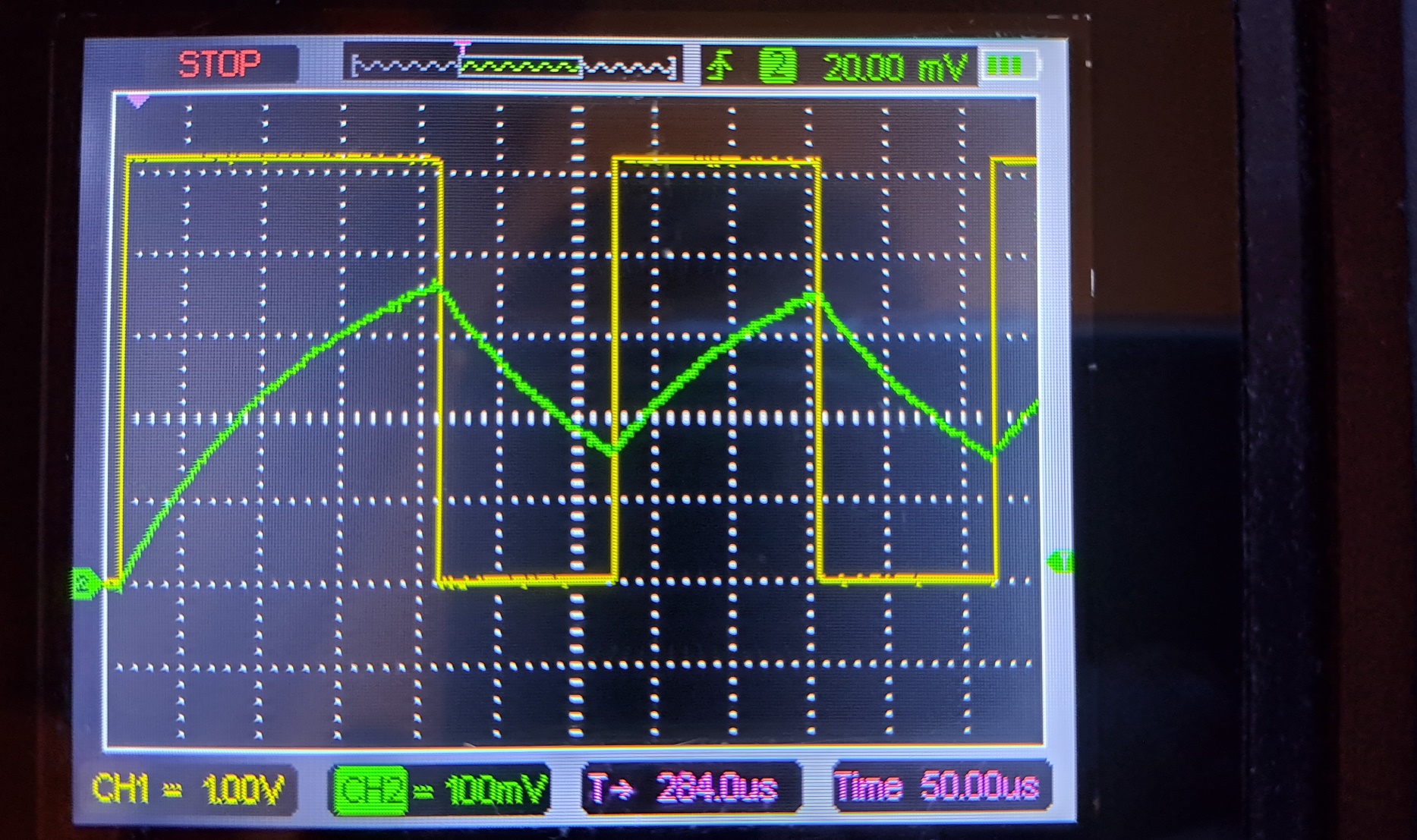
Do poprawnego działania systemu pomiarowego, konieczne jest także wykorzystanie interfejsu użytkownika, komunikującego się z układem laboratoryjnym, oraz zewnętrznego napięcia zasilania, które zapewnia stabilność i precyzję wskazań urządzenia.

Weryfikacja układu pomiarowego (rys 8.2) odbywała się poprzez podgląd przebiegów wewnątrz urządzenia. Kanał pierwszy przedstawia sygnał taktujący układ pomiarowy.   
Można zauważyć reakcję urządzenia na przekroczenie, przez charakterystykę ładowania/rozładowania (kanał 2), odpowiednich progów napięcia referencyjnego.

Mimo zastosowania trybu „x10” sondy oscyloskopowej, wniosła ona pewną pojemność pasożytniczą, dlatego pomiar z dołączonym urządzeniem wymaga dodatkowej kalibracji. Obecne ustawienia progów referencyjnych podczas pomiaru wynosiły 3,33 V (H\_THR)   
oraz 1,67 V (L\_THR). Przekroczenie jednego z tych progów aktywuje przerwanie mikrokontrolera, który przełącza stan na wyjściu taktującym.

Pomiar czasu ładowania i rozładowania odbywa się pomiędzy przełączeniami stanów sygnału taktującego. W ramach jednego pomiaru pojemności, mierzonych jest 128 próbek czasowych, łącznie ładowania i rozładowania obiektu badanego.

Charakterystyki umożliwiają także ocenienie stromości zbocz bufora trójstanowego,   
a także stabilność napięć wyjściowych tego elementu. Oba te czynniki zaważą na dokładności pomiarowej.



Rys 8.2. Przebieg ładowania i rozładowania rzeczywistego układu pomiarowego.

## Pomiar pojemności wzorcowych

Wyznaczenie wzorcowych wartości pojemności uzyskano na podstawie serii pomiarów urządzeniami laboratoryjnymi: Agilent E4980A Precision LCR Meter oraz Agilent 16047A Text Fixture.

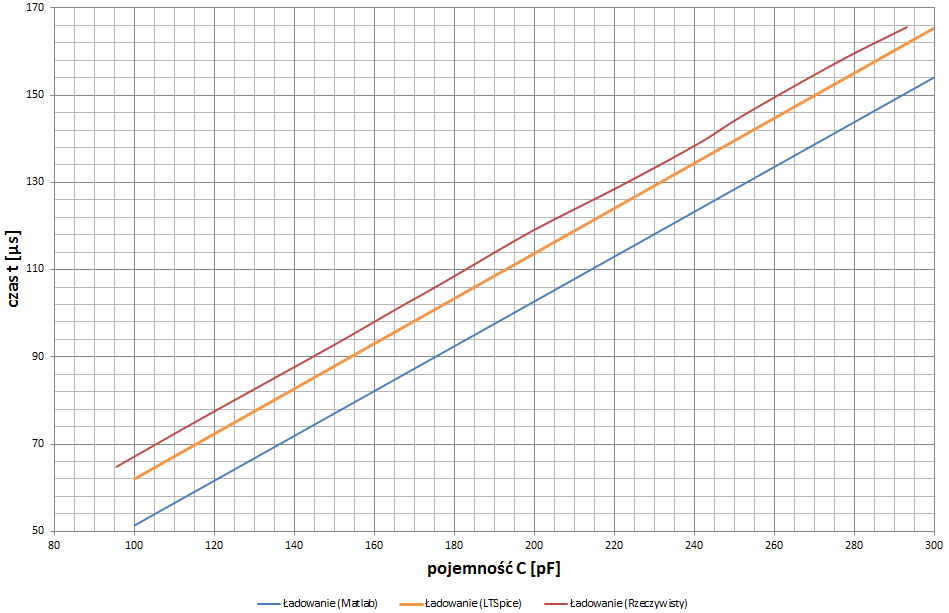
Pomiar wartości pojemności, odbywał się w tym samym środowisku pomiarowym, wykluczając wpływ np. zmian temperatury otoczenia na wskazania pojemności. Przeprowadzona seria 100 pomiarów została uśredniona, uzyskując tym samym dokładny, pozbawiony błędów losowych, wynik pojemności kondensatora. Wykorzystane mikowe, elementy pojemnościowe zapewniają stałe i dokładne parametry w długim okresie.   
Każdy pomiar wielkości, został poprzedzony kilku minutową pracą kondensatora w obwodzie prądu zmiennego, co pozwoliło na uzyskanie optymalnej temperatury pracy.

Zakres wyznaczonej charakterystyki obejmuje wartości pojemności od 100 do 300 pF. Do jej określenia wyznaczono 11 elementów wzorcowych (tabela 8.1).

Tabela 8.1. Wyniki pomiaru pojemności elementów wzorcowych [R = 741,2 kΩ].

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Pojemność wzorcowa [pF]** | **Pojemność zmierzona [pF]** | **Błąd bezwzględny [pF]** | **Błąd względny [%]** |
| 95,487 | 126,183 | 30,696 | 32,147 |
| 116,656 | 147,601 | 30,945 | 26,526 |
| 149,561 | 180,222 | 30,662 | 20,501 |
| 165,738 | 196,822 | 31,084 | 18,755 |
| 177,278 | 208,429 | 31,149 | 17,570 |
| 199,371 | 231,355 | 31,984 | 16,042 |
| 220,511 | 250,606 | 30,096 | 13,648 |
| 240,784 | 270,195 | 29,411 | 12,215 |
| 252,610 | 283,432 | 30,822 | 12,202 |
| 276,201 | 307,149 | 30,948 | 11,205 |
| 293,120 | 322,389 | 29,269 | 9,985 |

Błędy powstałe na skutek nieidealności układu laboratoryjnego sięgają około 30 pF   
na przestrzeni wszystkich wykonanych pomiarów. Wielkość ta oznacza pojemności pasożytnicze, powstające w rzeczywistym układzie laboratoryjnym. Celem kalibracji   
jest wyeliminowanie wpływu elementów pasożytniczych.



Rys 8.3. Porównanie charakterystyk czasów ładowania różnych modeli [R = 741,2 kΩ].

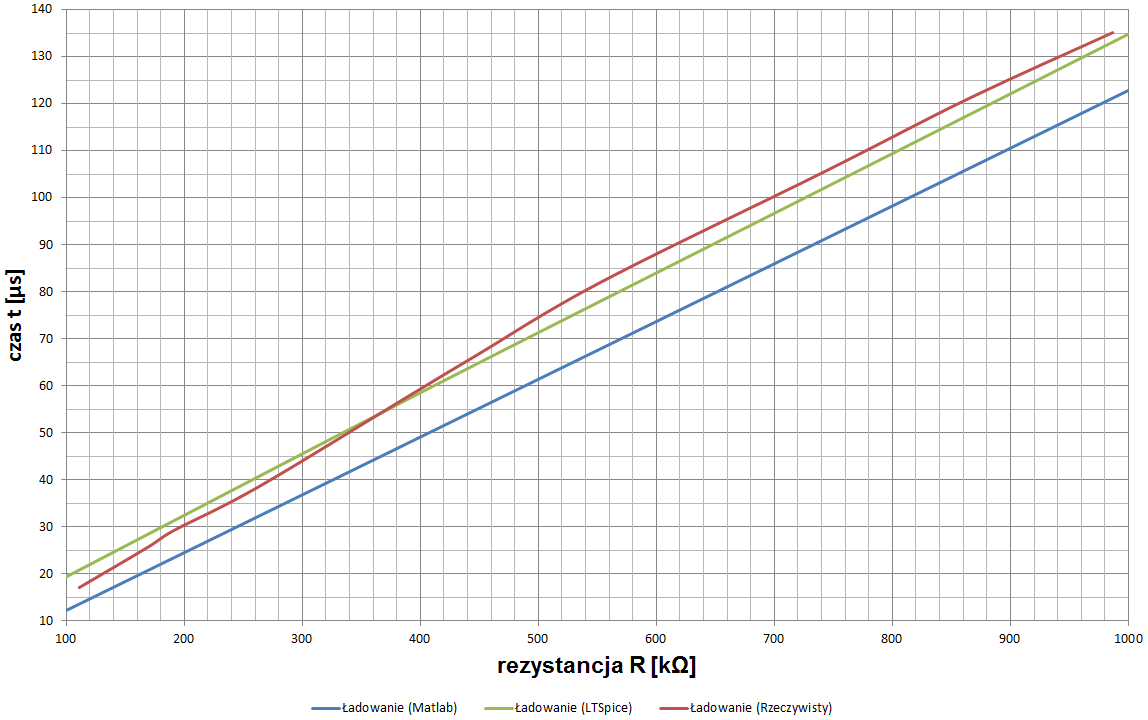
Charakterystyka czasów ładowania elementu pojemnościowego modelu rzeczywistego jest w przybliżeniu liniowa (rys 8.3). Okazuje się, że oszacowane wartości elementów pasożytniczych, uwzględnionych w modelu symulacyjnym są zbyt optymistyczne. Model rzeczywisty bowiem, charakteryzuje się jeszcze większymi wartościami pojemności pasożytniczych. Ukazuje to sensowność wykonywania symulacji, przed wykonaniem układu rzeczywistego. W niektórych przypadkach mogłoby okazać się, że pomiar zadanej wielkości fizycznej jest niemożliwy w modelu rzeczywistym, poprzez niepoprawnie zaprojektowany układ.

Za pomocą rezystancji wzorcowych (tabela 8.2) została wyznaczona charakterystyka czasów ładowania pojemności wzorcowej 177,2 pF. Wspomniana charakterystyka (rys 8.4) ukazuje nieliniową zależność pomiędzy rezystancją pomiarową oraz badaną pojemnością. Model rzeczywisty jest znacznie bardziej rozbudowany, niż zakładana symulacja.   
Oprócz pojemności pasożytniczych występują także pewne indukcyjności ścieżek na płytce PCB, taktowanie obwodu sygnałem zmiennym w czasie powoduje powstanie nieliniowych zjawisk, np. rezonansu.

Każdorazowa zmiana rezystora pomiarowego, wymusza na użytkowniku systemu wykonanie kalibracji urządzenia. W tym celu został opracowany skrypt Matlab wyznaczający współczynniki korekcji regresji liniowej oraz interpolacji Lagrange’a. Dodatkowo wyznacza   
charakterystykę korygującą punkty pomiarowe w zakresie od 100 do 300 pF, wykres błędów względnych, bezwzględnych oraz losowych, na podstawie punktów pomiarowych.

Tabela 8.2. Wpływ rezystancji na czasy ładowania i rozładowania pojemności 177,2 pF.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Wartość rezystancji wzorcowej [kΩ]** | **Zmierzony czas ładowania [μs]** | **Zmierzony czas rozładowania [μs]** |
| 110,9 | 17,13 | 16,70 |
| 168,5 | 25,64 | 25,65 |
| 191,2 | 29,30 | 29,02 |
| 260,9 | 38,27 | 38,20 |
| 385,1 | 57,10 | 57,63 |
| 446 | 66,30 | 66,15 |
| 552,6 | 82,04 | 81,96 |
| 741,2 | 105,43 | 105,17 |
| 866,4 | 121,34 | 121,12 |
| 986,7 | 135,15 | 135,07 |

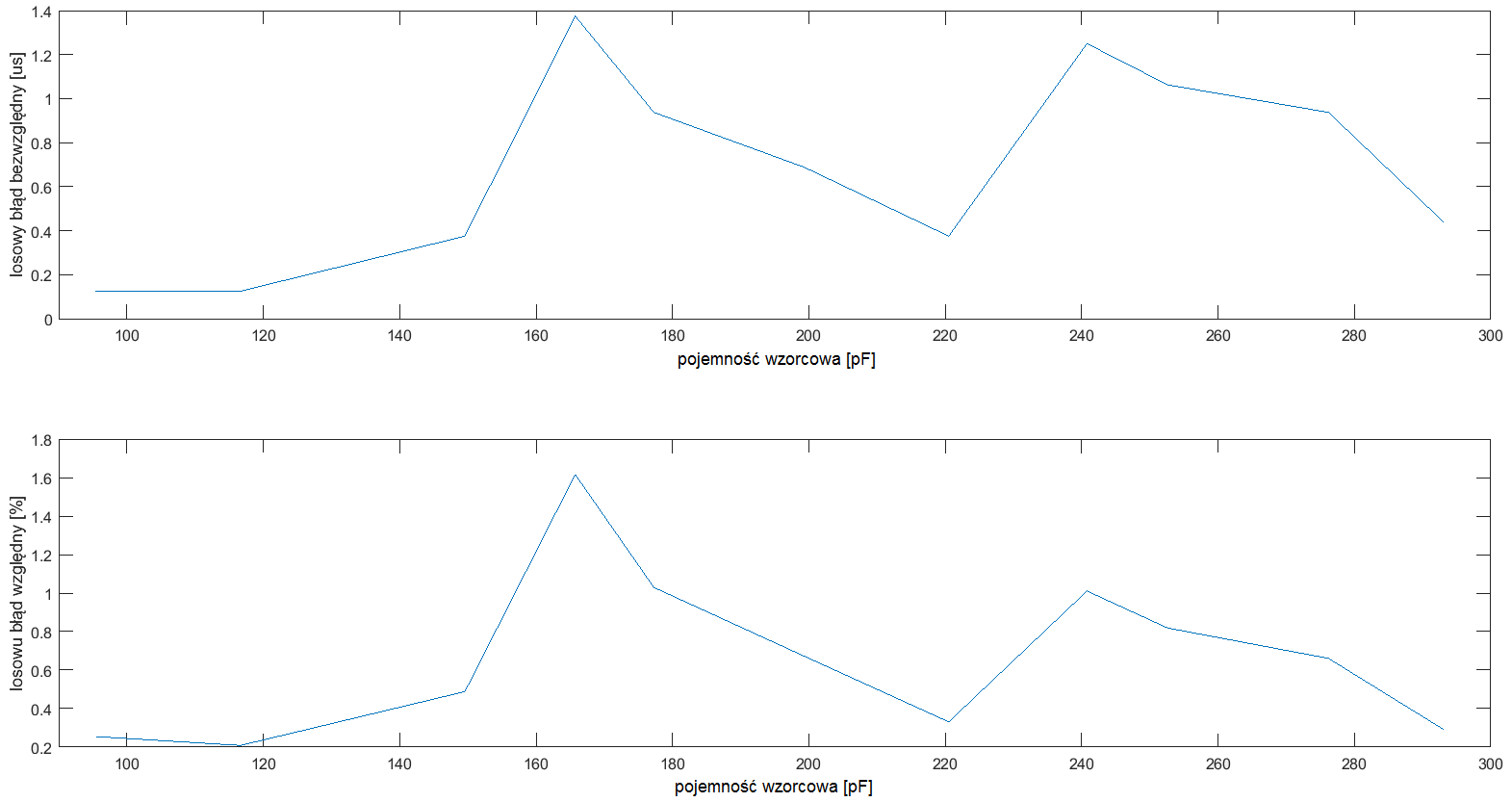


Rys 8.4. Porównanie charakterystyk czasów ładowania pojemności 177,2 pF.

Błędy losowe powstałe na skutek oddziaływania czynników zewnętrznych prezentują niepowtarzalny zbiór (rys 8.5), co świadczy o braku błędów systematycznych i poprawnym zaprojektowaniu układu pomiarowego. Dodatkowe ograniczenie przez zjawiskami zewnętrznymi zapewniłaby ekranowana obudowa, chroniąca np. doprowadzenia przed zewnętrznymi zakłóceniami elektromagnetycznymi. Na błąd losowy może wpływać również program wykonywany przez mikrokontroler ATmega32U4, ponieważ określony w dokumentacji czas wejścia do obsługi przerwania określony jest minimalną wartością. Program wykonujący instrukcję składającą się z kilku bajtów musi dokończyć jej wykonanie, co zajmuje więcej okresów zegara taktującego. Maksymalny błąd losowy sięga około 1,4 µs, co równoważne   
jest około 22 cykli zegara taktującego mikrokontroler.

Błędy losowe zostały wyznaczone na podstawie serii 100 pomiarów, w tym samym środowisku i krótkim odstępie czasowym, dla każdej ze wzorcowych wartości pojemności.   
Nie zauważono znaczącego wpływu błędów losowych na wyniki pomiarowe.

Podczas każdego z pomiarów uzyskano 128 próbek czasu ładowania   
oraz rozładowania, metoda wyznaczająca błędy losowe oparta jest o różnicę najmniejszej wartości próbki od jej największej wartości w zbiorze. Otrzymane 100 wartości z serii,   
zostały uśrednione. Automatyzacja obróbki danych za pomocą programu Matlab ułatwiła,   
zarówno składowanie danych oraz analizę.



Rys 8.5. Charakterystyka błędów losowych.

## Korekcja pomiarów

W podrozdziale zostaną zaprezentowane metody korekcji punktów pomiarowych, wykorzystane podczas realizacji projektu. Szczególną uwagę poświęcono prezentacji skryptu Matlab, wyznaczającego współczynniki korekcji, oraz omówieniu generowanych charakterystyk błędów.

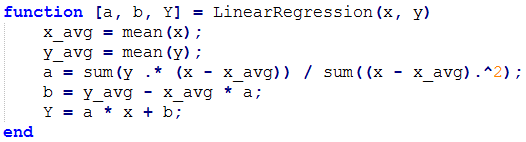
### Algorytm regresji liniowej

Regresja liniowa aproksymuje serię danych pomiarowych do funkcji pierwszego stopnia y = a·x + b, współczynniki wzoru określone są wzorami 8.1 oraz 8.2. Charakterystyka pomiarowa jest w przybliżeniu liniowa, dlatego jedna z metod korekcji wykorzystuje tą cechę. Algorytm realizujący regresję liniową (listing 8.1) został zaimplementowany w skrypt Matlab.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (8.1) |
|  | (8.2) |

gdzie:

* – współczynniki regresji liniowej,
* – średnia wartość zbioru danych objaśniających,
* – średnia wartość zbioru danych rzeczywistych,
* – zbiór danych objaśniających,
* – zbiór danych rzeczywistych.



Listing 8.1. Implementacja algorytmu regresji liniowej.

Maksymalna uzyskana niedokładność pomiaru po korekcji otrzymaną metodą wyniosła 0,678 % w zakresie od 100 do 300 pF (tabela 8.3). Oznacza to, że rozdzielczość pomiaru wilgotności względnej wyniesie aż 3 %, aby dodatkowo zwiększyć dokładność pomiarową   
użyto algorytmu interpolacji Lagrange’a.

Tabela 8.3. Korekcja z wykorzystaniem regresji liniowej.

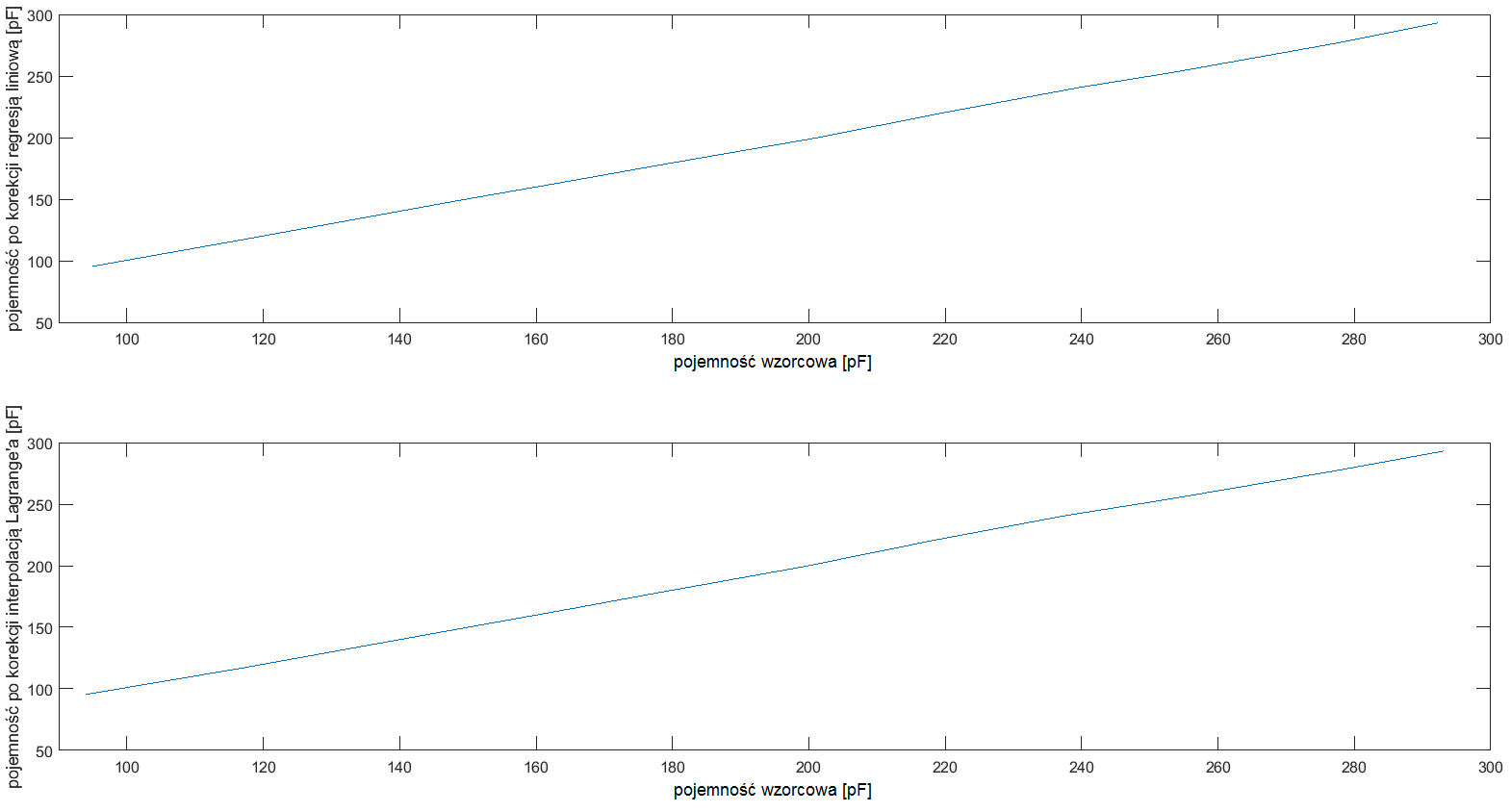
|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Pojemność wzorcowa [pF]** | **Pojemność po korekcji [pF]** | **Błąd bezwzględny [pF]** | **Błąd względny [%]** |
| 95,487 | 95,013 | -0,474 | -0,497 |
| 116,656 | 116,540 | -0,117 | -0,100 |
| 149,561 | 149,327 | -0,233 | -0,156 |
| 165,738 | 166,013 | 0,275 | 0,166 |
| 177,278 | 177,679 | 0,399 | 0,225 |
| 199,371 | 200,722 | **1,351** | **0,678** |
| 220,511 | 220,072 | -0,438 | -0,199 |
| 240,784 | 239,761 | -1,024 | -0,425 |
| 252,610 | 253,066 | 0,456 | 0,181 |
| 276,201 | 276,905 | 0,704 | 0,255 |
| 293,120 | 292,222 | -0,899 | -0,307 |

Wzór korygujący pojemność zmierzoną został zaprezentowany w formule 8.3, algorytm zastosowano dla wszystkich zmierzonych punktów pomiarowych.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (8.3) |

gdzie:

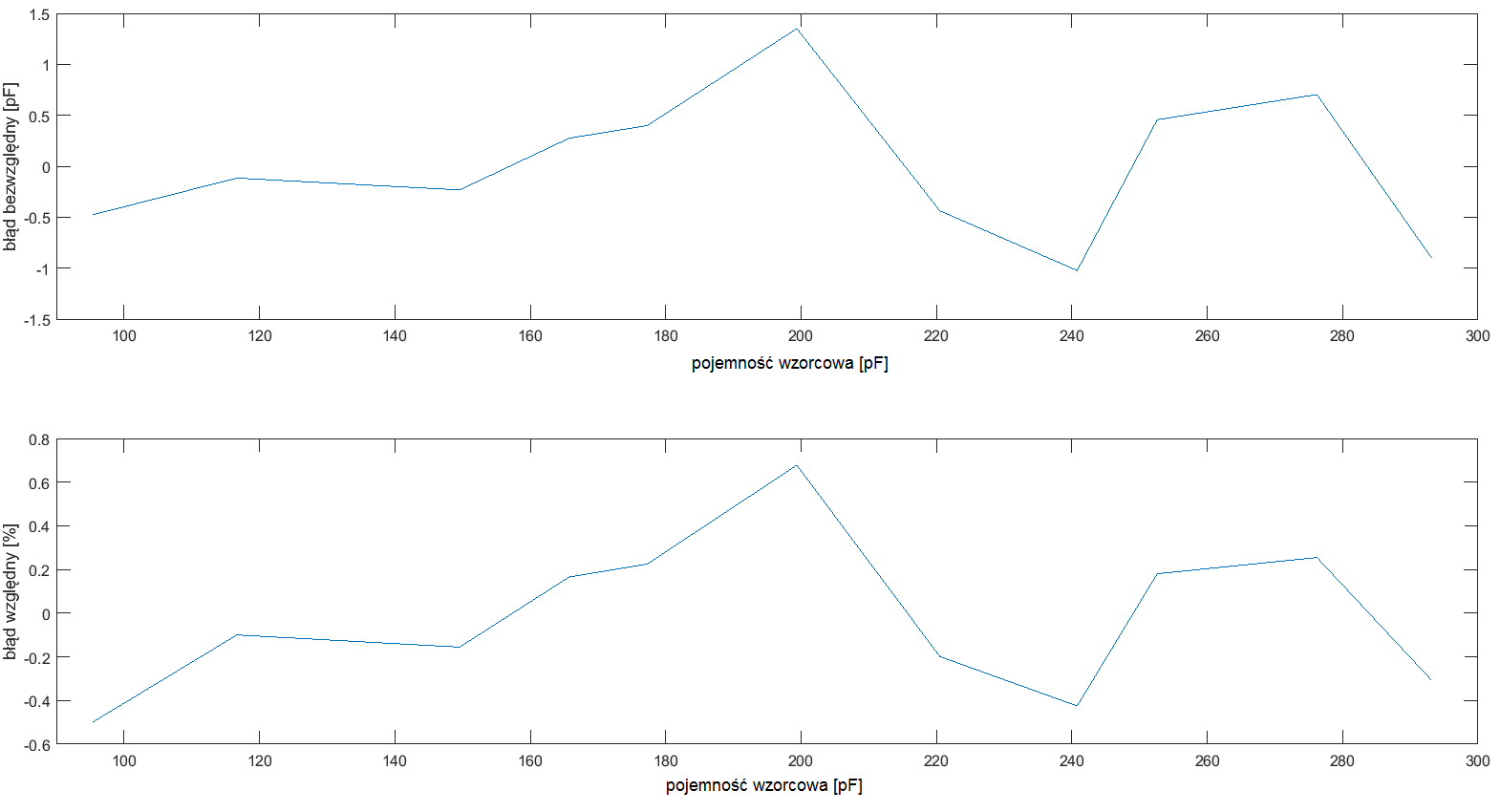
* – wartość pojemności po korekcji [pF],
* – wartość pojemności zmierzonej [pF].



Rys 8.6. Charakterystyka korekcji pojemności wielomianem pierwszego stopnia.

Charakterystyka aproksymacji wielomianem pierwszego stopnia (rys 8.6)   
nie jest wymagająca obliczeniowo. Może zostać zaimplementowana wewnątrz programu mikrokontrolera. Nie zachowuje jednak wystarczającej dokładności, w przypadku realizacji układu rzeczywistego, powodem tego może być znacznie bardziej złożony model, zawierający zjawiska nieliniowe np. rezonanse czy linie długie, oraz elementy pasożytnicze.

Błędy korekcji wielomianem pierwszego stopnia (rys 8.7), w zakresie małych wartości pojemności, posiadają akceptowalne błędy sięgające 0,2 %. Największe błędy zaobserwowano w okolicach 200 pF wartości pojemności wzorcowej, co może częściowo nachodzić   
na charakterystykę przyjmowanych pojemności przez sensor HS1101.



Rys 8.7. Charakterystyki błędów po korekcji pojemności wielomianem 1. stopnia.

### Algorytm interpolacji Lagrange’a

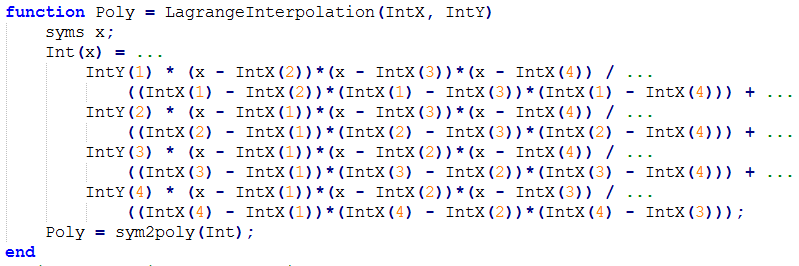
Interpolacja Lagrange’a jest numeryczną metodą przybliżania funkcji wielomianem  
 stopnia w wybranych punktach. Oznacza to, że otrzymany wielomian przechodzi dokładnie przez wyznaczone punkty pomiarowe, aproksymując charakterystykę pomiędzy nimi. Algorytm służący do wyznaczenia wielomianu interpolacyjnego (8.4) wymaga serii danych pozwalających na jego wyznaczenie. Wewnątrz programu zaimplementowano możliwość interpolacji wielomianem 3 stopnia. Oznacza to, że algorytm skorzysta z 4 punktów pomiarowych pojemności wzorcowych, które dobrano doświadczalnie, aby zachować   
jak najwierniejsze odwzorowanie charakterystyki w przedziale przybieranych wartości   
przez sensor HS1101 (161 – 193 pF) [14].

|  |  |
| --- | --- |
|  | (8.4) |

gdzie:

* – zbiór wartości pojemności wzorcowych,
* – zbiór wartości pojemności zmierzonych.

Algorytm interpolacji Lagrange’a został zaimplementowany w skrypcie Matlab (listing 8.2), który umożliwia zdefiniowanie symboli zmiennych, pozwalając w przejrzysty sposób wprowadzać skomplikowane formuły. Język ten zapewnia także funkcje umożliwiające przejście ze struktury formuły do tablicy współczynników wielomianu (ang. polynomial). W późniejszym etapie charakterystyka korekcyjna zostaje wyznaczona bezpośrednio z otrzymanych współczynników wielomianu.



Listing 8.2. Implementacja algorytmu interpolacji Lagrange’a.

Ponieważ głównym celem realizacji projektu jest integracja urządzenia laboratoryjnego   
z czujnikiem wilgotności względnej HS1101, algorytm interpolacji Lagrange’a   
został wykalibrowany z myślą o pracy układu pomiarowego z pojemnościami z przedziału:   
161 – 193 pF [14]. Zapewniając również w szerszym zakresie błąd względny, mniejszy   
od 0,1 %. Taka dokładność pomiaru zapewnia rozdzielczość odczytu wilgotności względnej   
na poziomie 0,3125 %, co jest w zupełności wystarczającą wartością (tabela 8.4).   
Chęć dokładniejszej aproksymacji większego przedziału charakterystyki doprowadziła   
do uzyskania maksymalnej wartości błędu względnego na poziomie 0,5 %. Niezwykłą zaletą   
tej metody jest możliwa konfiguracja charakterystyki korygującej, poprzez dobór serii danych pomiarowych, zasilających algorytm interpolacji.

Tabela 8.4. Korekcja z wykorzystaniem interpolacji Lagrange’a.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Pojemność wzorcowa [pF]** | **Pojemność po korekcji [pF]** | **Błąd bezwzględny [pF]** | **Błąd względny [%]** |
| 95,487 | 94,016 | -1,471 | -1,541 |
| 116,656 | 116,656 | 0 | 0 |
| 149,561 | 149,560 | 0 | 0 |
| 165,738 | 165,838 | 0,100 | 0,060 |
| 177,278 | 177,124 | -0,156 | -0,088 |
| 199,371 | 199,371 | 0 | 0 |
| 220,511 | 218,208 | -2,302 | -1,044 |
| 240,784 | 237,737 | -3,047 | -1,266 |
| 252,610 | 251,244 | -1,366 | -0,541 |
| 276,201 | 276,300 | 0,099 | 0,036 |
| 293,120 | 293,120 | 0 | 0 |

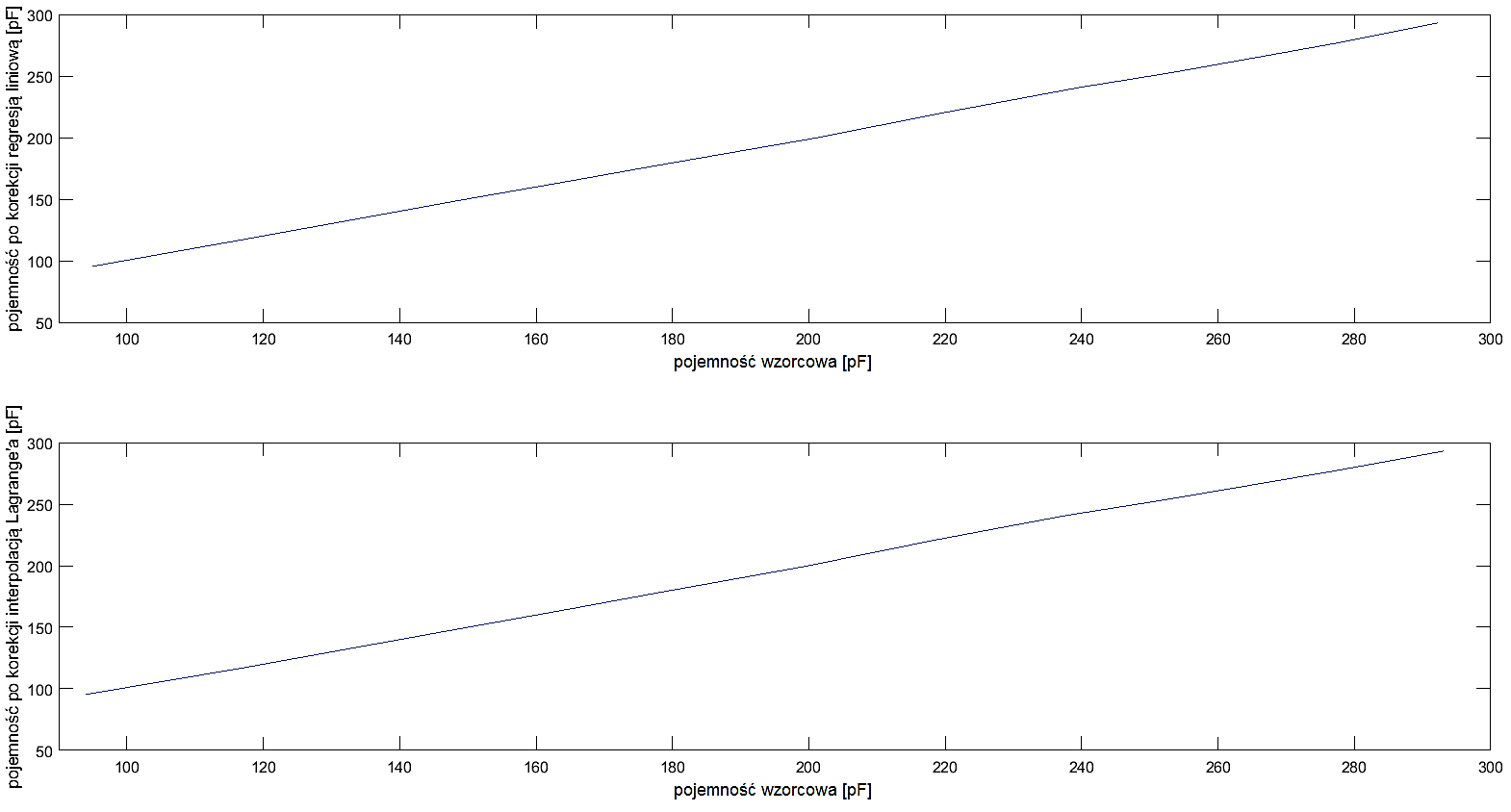
Wyznaczony wielomian korekcyjny 3 stopnia, został zaprezentowany w formule 8.5, seria danych zapewniająca akceptowane dokładności pomiarowe, składa się z wartości wzorcowych: 116,656 pF, 149,561 pF, 199,371 pF oraz 293,120 pF. Potwierdzają to zerowe błędy interpolacji (tabela 8.4).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (8.5) |

gdzie:

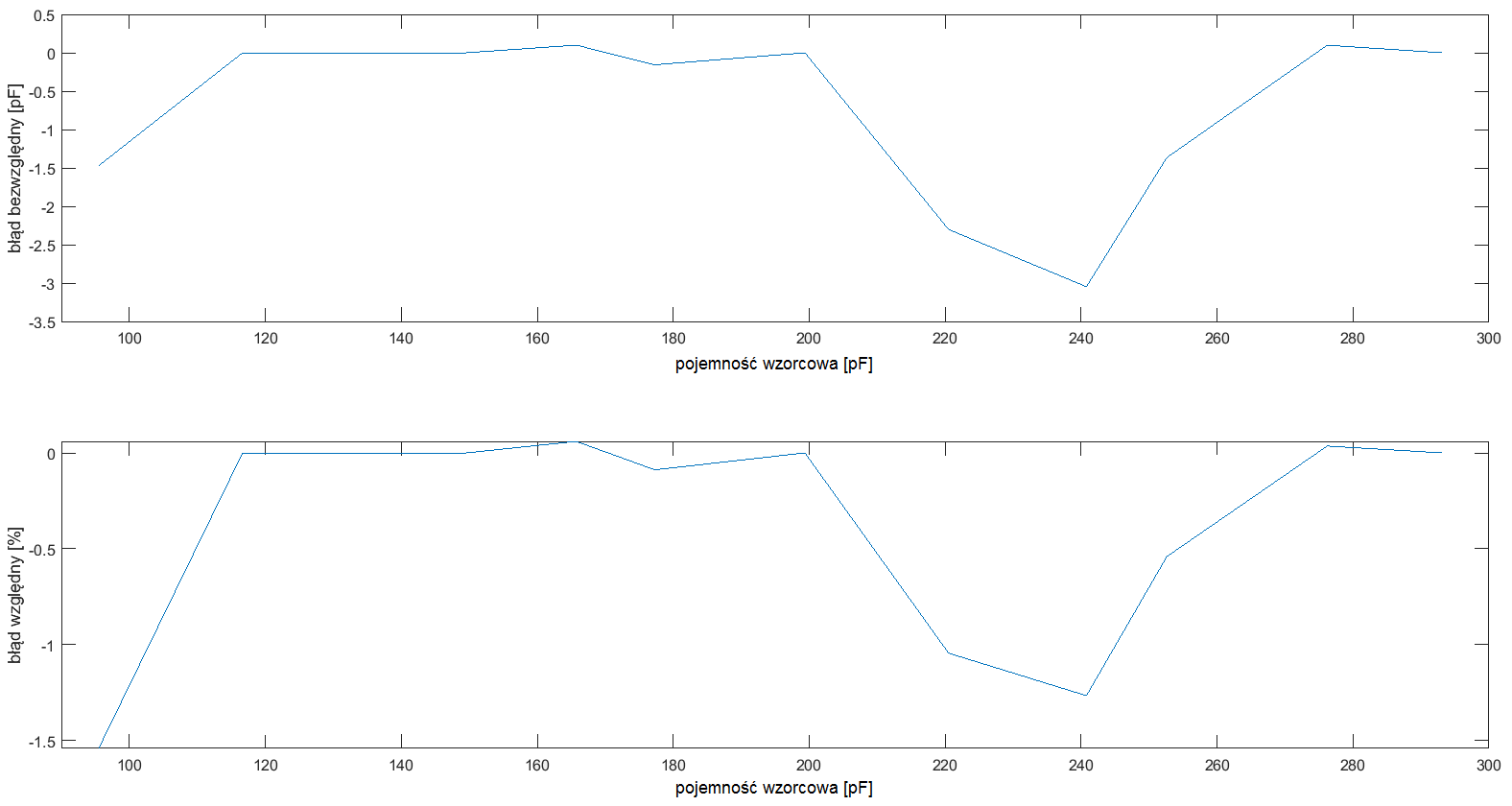
* – wartość pojemności po korekcji [F],
* – wartość pojemności zmierzonej [F].

Charakterystyka korekcyjna trzeciego stopnia (rys 8.8) jest wymagająca obliczeniowo, ze względów czasowych, wykorzystanie go wewnątrz 8-bitowego mikrokontrolera   
jest niemożliwe. Aproksymacja zapewnia najmniejsze błędy wewnątrz przedziału obejmującego wskazania czujnika HS1101. Każdorazowa zmiana rezystora pomiarowego wymaga kalibracji układu pomiarowego oraz charakterystyki korekcyjnej.



Rys 8.8. Charakterystyka korekcji pojemności wielomianem trzeciego stopnia.

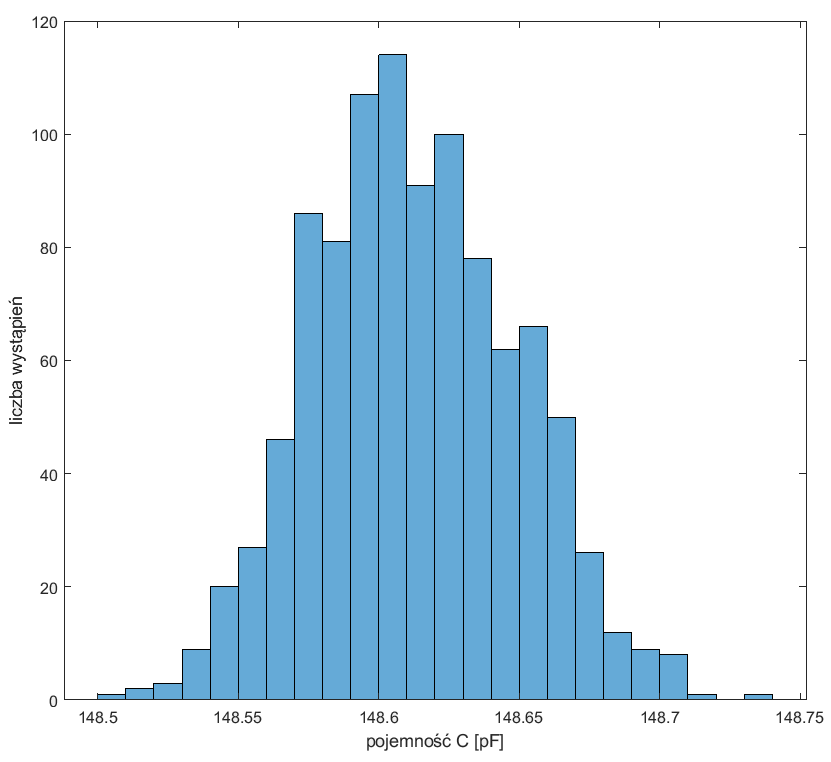
W przedziale od 115 do 200 pF wskazania pojemności zmierzonej praktycznie pokrywają się z wartościami wzorcowymi (rys 8.9). Podczas pomiaru wartości większej   
niż 200 pF zaobserwowano wyraźne odchylenie charakterystyki błędu do -1,2 %. Cecha   
ta powtarza się dla 3 bliskich siebie wartości pojemności, świadczy to o zajściu zjawisk nieliniowych podczas pomiaru. Występujące błędy mają charakter systematyczny,   
gdyż wartości zostały uśrednione, eliminując tym samym błąd losowy. Podobne zjawisko zaobserwować można dla pojemności mniejszej od 100 pF. Pomiar tak niskich wartości   
oparty jest błędem rozdzielczości czasowej mikrokontrolera oraz nadmiernym ładowaniem   
i rozładowaniem pojemności badanej, w czasie obsługi przerwania przez procesor.   
Dlatego pomiar ten nie został wzięty pod uwagę podczas wyznaczania korekcji danych.



Rys 8.9. Charakterystyki błędów po korekcji pojemności wielomianem 3. stopnia.

Za pomocą histogramu możliwe jest graficzne przedstawienie rozkładu badanej pojemności. W celu jego wyznaczenia wykonano 1000 pomiarów, pominięto zaokrąglanie wyniku, dla pojemności badanej 148,6 pF (rys 8.10). Kolejne wyzwalanie pomiaru odbywało   
się co 0,5 s. Wynik doświadczenia ukazuje liczbę wystąpień zmierzonych wartości pojemności. Zgodnie z założeniami posiada on charakter rozkładu Gaussa.

Jednym z najważniejszych wniosków płynących z doświadczenia jest określenie precyzji pomiarowej, która w tym przypadku wynosi 0,2 pF, co jest bardzo dobrym wynikiem. Przełożenie tej wartości na wilgotność względną odpowiada 0,625 % RH w przeciągu ponad 8 minutowego pomiaru. Natomiast znaczna większość wyników mieści się w granicach 148,58 – 148,64 pF. Oznacza to, że zaokrąglanie wyniku pomiarowego pozytywnie wpłynie   
na stabilność i dokładność wskazań. Dodatkową poprawę precyzji pomiarowej udałoby   
się uzyskać, dzięki zastosowaniu ekranowanej obudowy, wpływ otoczenia podczas kilkuminutowego pomiaru z pewnością oddziałuje na układ pomiarowy.



Rys 8.10. Histogram serii 1000 pomiarów pojemności 148,6 pF.

# Podsumowanie

W niniejszej pracy dyplomowej zaprojektowano i zrealizowano układ inteligentnego czujnika pojemnościowego, bazującego na 8-bitowym mikrokontrolerze ATmega32U4.   
Dzięki takiej konfiguracji wykorzystano wbudowany interfejs USB, służący do komunikacji   
z interfejsem użytkownika. Aplikacja komputerowa umożliwiła kalibrację, analizę danych   
oraz monitorowanie wilgotności względnej w czasie rzeczywistym. Pomiar oparto na czujniku pojemnościowym HS1101, którego parametry zależą bezpośrednio od wilgotności otoczenia. Dokonano także weryfikacji pomiarowej, dzięki której osiągnięto błąd względny na poziomie  
0,1 % dla zakresu pokrywającego się ze wskazaniami sensora HS1101, realizując tym samym wszystkie założone cele.

Część teoretyczna została zapoczątkowana przeglądem możliwych metod pomiarowych. Słusznie zauważono, że metoda ładowania/rozładowania członu RC pozwoli   
na dokładny pomiar pojemności rzędu pF. Szczególną uwagę poświęcono omówieniu modelu matematycznego, idealnego układu pomiarowego, a także symulacji modelu z uwzględnieniem elementów pasożytniczych, w programie typu Spice. Okazało się, że model symulacyjny, realnie odzwierciedla zjawiska wyłaniające się z rzeczywistym układzie pomiarowym.

Wyniki pomiarów, jakie uzyskano drogą doświadczalną, są zadowalające. Powstałe błędy są w pełni akceptowalne i pozwalające na wyznaczenie wilgotności względnej,   
z dokładnością 0,3125 % RH. Natomiast, precyzja wewnątrz 10 minutowego, ciągłego pomiaru została doświadczalnie określona wartością 0,625 % RH. Takie parametry charakteryzują dokładne urządzenia laboratoryjne.

Realizacja prototypowego układu pozwala na łatwą konfigurację progów napięć referencyjnych oraz rezystancji pomiarowych, żądanych przez użytkownika systemu.   
Jednym z ograniczeń rozwiązania jest brak obudowy ekranującej. Szereg złącz diagnostycznych oraz układ pomiarowy, są narażone na działanie zewnętrznych zakłóceń. Czynnikiem wpływającym na charakter pomiaru jest także, rozdzielczość zegara taktującego mikrokontroler. Zastosowanie 32-bitowych jednostek, opartych na pętli PLL, pozwoliłoby   
na znaczące zmniejszenie opóźnienia wnoszonego przez przerwanie, a tym samym dokładniejsze wyznaczenie czasów ładowania i rozładowania pojemności mniejszych   
od 100 pF.

# Wykaz literatury

1. Czaja Z*. A measurement method for capacitive sensors based on a versatile direct   
   sensor-to-microcontroller interface circuit* (2020).
2. Czaja Z. *A measurement method for lossy capacitive relative humidity sensors based on a direct sensor-to-microcontroller interface circuit* (2021).
3. Czaja Z. *Measurement method for capacitive sensors for microcontrollers based on a phase shifter* (2022).
4. Meng Y., Dean R. N. *A Technique for Improving the Linear Operating Range for a Relative Phase Delay Capacitive Sensor Interface Circuit* (2016).
5. Meng Y., Dean R. N., Adams M. L. *Improving the phase delay capacitive interface circuit technique using MOSFET switches* (2019).
6. Skiba A., Tiliouine H. *Stany nieustalone w obwodach elektrycznych. Przykłady i zadania.* Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2022.
7. Kardaś M. *Mikrokontrolery AVR. Język C. Podstawy programowania.* Wyd. ATNEL, Szczecin 2011.
8. Baranowski R. *Mikrokontrolery AVR ATmega w praktyce.* Wyd. BTC, Warszawa 2005.
9. Sells C. *Windows Forms Programming in C#.* Wyd. Addison-Wesley Professional, 2003.
10. Sklep internetowy z modułami elektronicznymi (data dostępu: 1.10.2022 r.)  
    [*https://botland.com.pl/*](https://botland.com.pl/)
11. Nota katalogowa mikrokontrolera ATmega32U4 (data dostępu: 1.10.2022 r.)  
    [*https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/  
    atmel-7766-8-bit-avr-atmega16u4-32u4\_datasheet.pdf*](https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-7766-8-bit-avr-atmega16u4-32u4_datasheet.pdf)
12. Nota katalogowa modułu Arduino Micro (data dostępu: 1.10.2022 r.)  
    [*https://docs.arduino.cc/hardware/micro*](https://docs.arduino.cc/hardware/micro)
13. Nota katalogowa modułu SHTC3 (data dostępu: 1.10.2022 r.)  
    [*https://sensirion.com/media/documents/643F9C8E/6164081E/  
    Sensirion\_Humidity\_Sensors\_SHTC3\_Datasheet.pdf*](https://sensirion.com/media/documents/643F9C8E/6164081E/Sensirion_Humidity_Sensors_SHTC3_Datasheet.pdf)
14. Nota katalogowa czujnika wilgotności HS1101 (data dostępu: 1.10.2022 r.)  
    [*https://www.jameco.com/Jameco/Products/ProdDS/2082901.pdf*](https://www.jameco.com/Jameco/Products/ProdDS/2082901.pdf)
15. Nota katalogowa stabilizatora monolitycznego 7805 (data dostępu: 1.10.2022 r.)  
    [*https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm340.pdf*](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm340.pdf)
16. Nota katalogowa układu komparatora TLV3502AID (data dostępu: 1.10.2022 r.)  
    [*https://www.ti.com/lit/ds/sbos507a/sbos507a.pdf*](https://www.ti.com/lit/ds/sbos507a/sbos507a.pdf)
17. Nota katalogowa bufora trójstanowego, 74AHC244 (data dostępu: 1.10.2022 r.)  
    [*https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn54ahc244-sp.pdf*](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn54ahc244-sp.pdf)
18. Nota katalogowa biblioteki LUFA USB (wersja oprogramowania: 210130)   
    [*http://www.fourwalledcubicle.com/LUFA.php*](http://www.fourwalledcubicle.com/LUFA.php)

# Wykaz rysunków

[Rys 2.1. Schemat ideowy układu pomiarowego przesuwnika fazowego [4]. 8](#_Toc119615912)

[Rys 2.2. Schemat blokowy metody pomiarowej sygnałem prostokątnym [1]. 9](#_Toc119615913)

[Rys 2.3. Schemat blokowy metody pomiarowej, bazującej na ładowaniu/rozładowaniu RC. 10](#_Toc119615914)

[Rys 2.4. Charakterystyka błędu względnego, w zależności przesunięcia fazowego [5]. 11](#_Toc119615915)

[Rys 2.5. Sygnały panujące w metodzie pobudzenia sygnałem prostokątnym [1]. 12](#_Toc119615916)

[Rys 3.1. Obwód pomiarowy. 13](#_Toc119615917)

[Rys 3.2. Analiza operatorowa obwodu pomiarowego. 13](#_Toc119615918)

[Rys 3.3. Przekształcony obwód pomiarowy w dziedzinie operatorowej. 14](#_Toc119615919)

[Rys 3.4. Schemat bloku pomiarowego – symulacja. 15](#_Toc119615920)

[Rys 3.5. Schemat bloku porównywania napięć progowych – symulacja. 16](#_Toc119615921)

[Rys 3.6. Schemat podłączenia mikrokontrolera – symulacja. 17](#_Toc119615922)

[Rys 3.7. Schemat bufora trójstanowego – symulacja. 18](#_Toc119615923)

[Rys 3.8. Charakterystyka czasu ładowania i rozładowania dla rezystancji R = 741,2 kΩ. 19](#_Toc119615924)

[Rys 3.9. Charakterystyka czasu ładowania i rozładowania dla pojemności C = 177,2 pF. 20](#_Toc119615925)

[Rys 3.10. Charakterystyka sygnałów w czasie pomiaru, C = 177,2 pF, R = 741,2 kΩ. 21](#_Toc119615926)

[Rys 4.1. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego. 22](#_Toc119615927)

[Rys 4.2. Schemat blokowy układu laboratoryjnego. 23](#_Toc119615928)

[Rys 4.3. Schemat ideowy układu zasilającego. 24](#_Toc119615929)

[Rys 4.4. Moduł Arduino Micro [10]. 25](#_Toc119615930)

[Rys 4.5. Schemat ideowy podłączenia modułu Arduino Micro. 26](#_Toc119615931)

[Rys 4.6. Moduł SHTC3 [10]. 27](#_Toc119615932)

[Rys 4.7. Moduł wyświetlacza alfanumerycznego LCD [10]. 28](#_Toc119615933)

[Rys 4.8. Schemat ideowy bufora trójstanowego. 28](#_Toc119615934)

[Rys 4.9. Schemat ideowy członu pomiarowego RC. 29](#_Toc119615935)

[Rys 4.10. Schemat ideowy toru napięć referencyjnych. 30](#_Toc119615936)

[Rys 4.11. Schemat ideowy toru przetwarzania sygnału pomiarowego. 31](#_Toc119615937)

[Rys 4.12. Schemat ideowy złącz diagnostycznych. 32](#_Toc119615938)

[Rys 4.13. Projekt mozaiki PCB – górna strona. 33](#_Toc119615939)

[Rys 4.14. Projekt mozaiki PCB – dolna strona. 33](#_Toc119615940)

[Rys 4.15. Realizacja fizyczna układu laboratoryjnego. 34](#_Toc119615941)

[Rys 5.1. Rejestr statusowy mikrokontrolera ATmega32U4 [11]. 35](#_Toc119615942)

[Rys 5.2. Diagram kontrolera USB [11]. 36](#_Toc119615943)

[Rys 5.3. Schemat blokowy układu licznika w trybie przechwytywania zdarzeń [11]. 37](#_Toc119615944)

[Rys 5.4. Rejestr konfiguracyjny licznika 1 [11]. 38](#_Toc119615945)

[Rys 5.5. Rejestr masek przerwań licznika 1 [11]. 38](#_Toc119615946)

[Rys 5.6. Sposób podłączenia urządzeń w interfejsie TWI [11]. 39](#_Toc119615947)

[Rys 5.7. Typowa transmisja danych interfejsu TWI [11]. 39](#_Toc119615948)

[Rys 5.8. Rejestr kontrolny interfejsu TWI [11]. 39](#_Toc119615949)

[Rys 6.1. Algorytm pętli głównej programu mikrokontrolera. 42](#_Toc119615950)

[Rys 6.2. Algorytm prezentujący pomiar pojemności. 46](#_Toc119615951)

[Rys 7.1. Strona startowa interfejsu użytkownika. 48](#_Toc119615952)

[Rys 7.2. Ustawienia ogólne interfejsu użytkownika. 49](#_Toc119615953)

[Rys 7.3. Przykład charakterystyki wilgotności i temperatury w czasie. 50](#_Toc119615954)

[Rys 7.4. Kalibracja urządzenia z poziomu interfejsu użytkownika. 52](#_Toc119615955)

[Rys 7.5. Wywołanie pomiarów z poziomu interfejsu użytkownika. 53](#_Toc119615956)

[Rys 7.6. Podgląd charakterystyk w interfejsie użytkownika. 56](#_Toc119615957)

[Rys 7.7. Dziennik zdarzeń interfejsu użytkownika. 57](#_Toc119615958)

[Rys 8.1. Diagram stanowiska pomiarowego. 58](#_Toc119615959)

[Rys 8.2. Przebieg ładowania i rozładowania rzeczywistego układu pomiarowego. 59](#_Toc119615960)

[Rys 8.3. Porównanie charakterystyk czasów ładowania różnych modeli [R = 741,2 kΩ]. 61](#_Toc119615961)

[Rys 8.4. Porównanie charakterystyk czasów ładowania pojemności 177,2 pF. 63](#_Toc119615962)

[Rys 8.5. Charakterystyka błędów losowych. 64](#_Toc119615963)

[Rys 8.6. Charakterystyka korekcji pojemności wielomianem pierwszego stopnia. 66](#_Toc119615964)

[Rys 8.7. Charakterystyki błędów po korekcji pojemności wielomianem 1. stopnia. 67](#_Toc119615965)

[Rys 8.8. Charakterystyka korekcji pojemności wielomianem trzeciego stopnia. 70](#_Toc119615966)

[Rys 8.9. Charakterystyki błędów po korekcji pojemności wielomianem 3. stopnia. 70](#_Toc119615967)

[Rys 8.10. Histogram serii 1000 pomiarów pojemności 148,6 pF. 71](#_Toc119615968)

# Wykaz tabel

[Tabela 8.1. Wyniki pomiaru pojemności elementów wzorcowych [R = 741,2 kΩ]. 60](#_Toc119536779)

[Tabela 8.2. Wpływ rezystancji na czasy ładowania i rozładowania pojemności 177,2 pF. 62](#_Toc119536780)

[Tabela 8.3. Korekcja z wykorzystaniem regresji liniowej. 66](#_Toc119536781)

[Tabela 8.4. Korekcja z wykorzystaniem interpolacji Lagrange’a. 69](#_Toc119536782)

# Wykaz listingów

[Listing 6.1. Funkcja inicjalizacji interfejsu USB. 41](#_Toc119447645)

[Listing 6.2. Funkcja inicjalizacji modułu przechwytywania . 41](#_Toc119447646)

[Listing 6.3. Obsługa instrukcji kalibrujących. 43](#_Toc119447647)

[Listing 6.4. Definicja domyślnych wartości struktur danych kalibracyjnych. 44](#_Toc119447648)

[Listing 6.5. Funkcja pomiaru pojemności. 47](#_Toc119447649)

[Listing 6.6. Obsługa przerwania modułu przechwytywania zdarzeń zewnętrznych. 47](#_Toc119447650)

[Listing 7.1. Przykład eksportu dziennika zdarzeń w formacie XML. 51](#_Toc119447651)

[Listing 7.2. Funkcja wyznaczająca pojemność z danych pomiarowych. 53](#_Toc119447652)

[Listing 7.3. Funkcja realizująca nadpróbkowanie i decymację. 54](#_Toc119447653)

[Listing 7.4. Funkcja obliczająca pojemność. 54](#_Toc119447654)

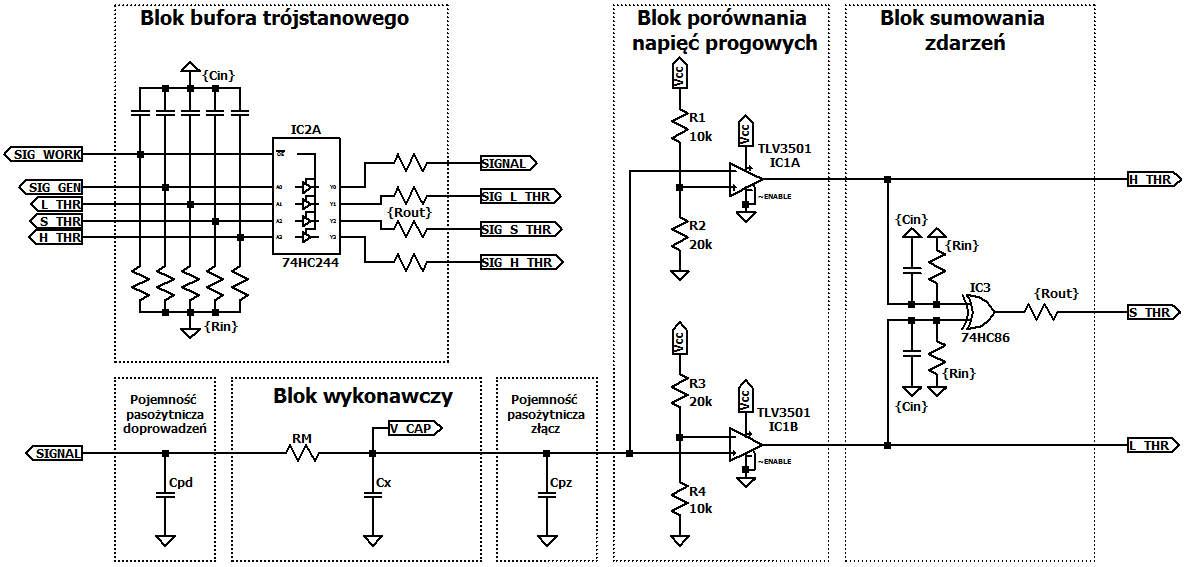
[Listing 7.5. Funkcja obliczająca wilgotność względną na podstawie pojemności czujnika. 55](#_Toc119447655)

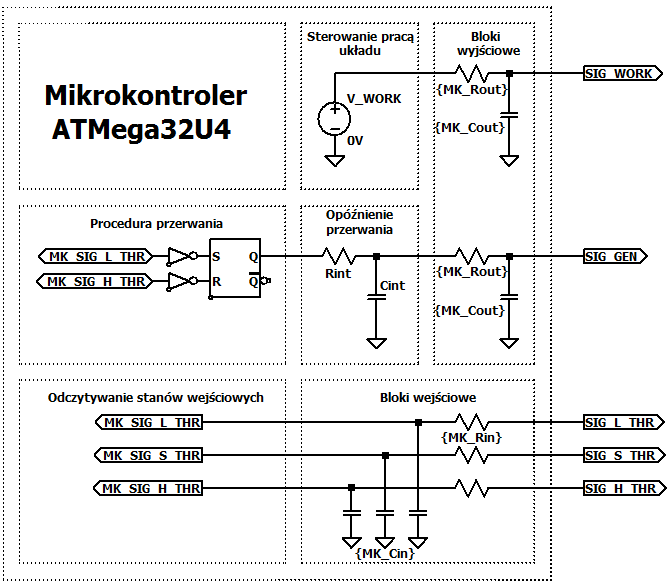
[Listing 7.6. Zestaw instrukcji interpretowanych przez układ laboratoryjny. 57](#_Toc119447656)

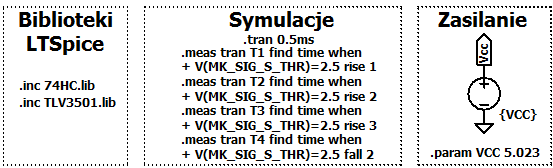
[Listing 8.1. Implementacja algorytmu regresji liniowej. 65](#_Toc119447657)

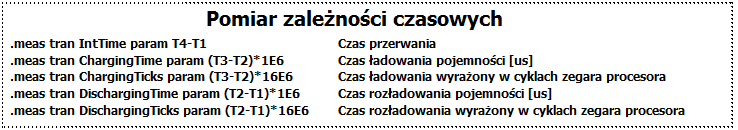
[Listing 8.2. Implementacja algorytmu interpolacji Lagrange’a. 68](#_Toc119447658)

# DODATEK A – SYMULACJA LTSPICE

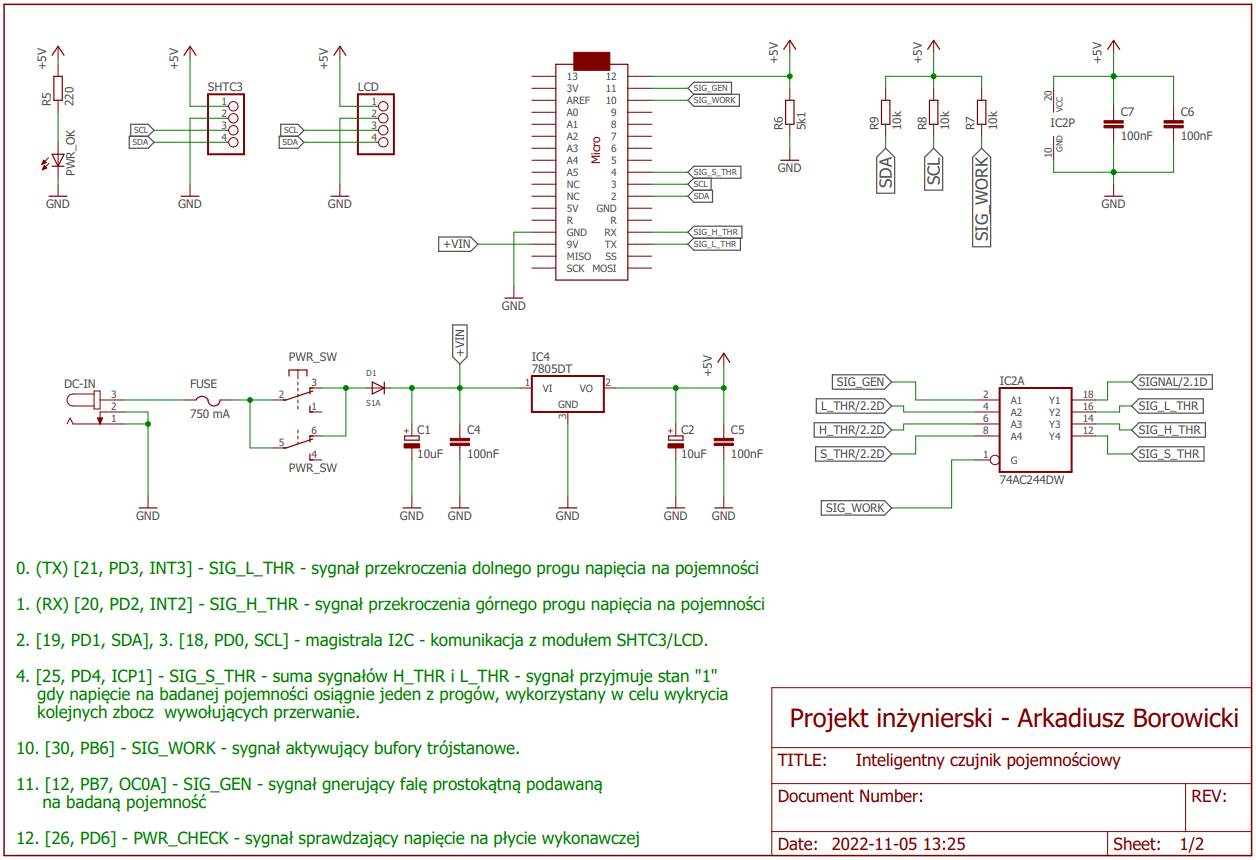


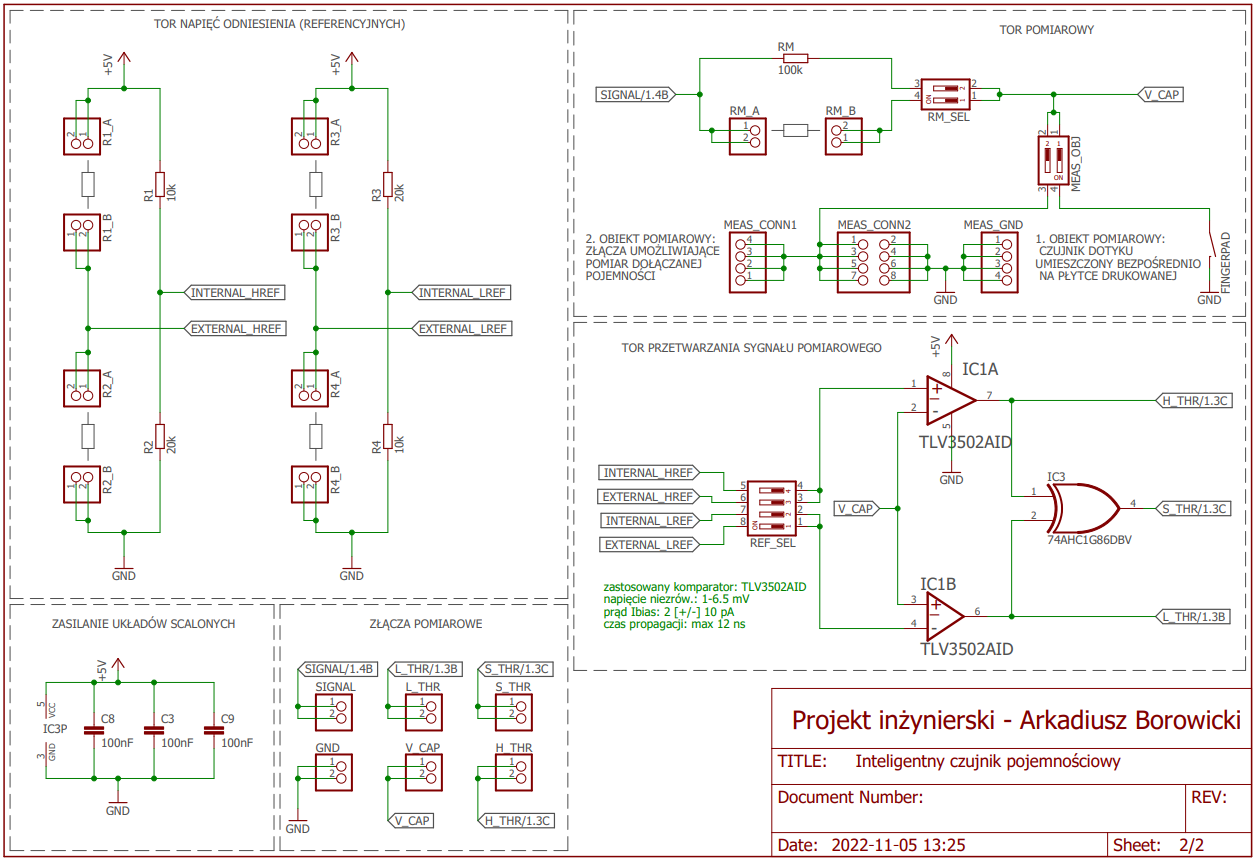






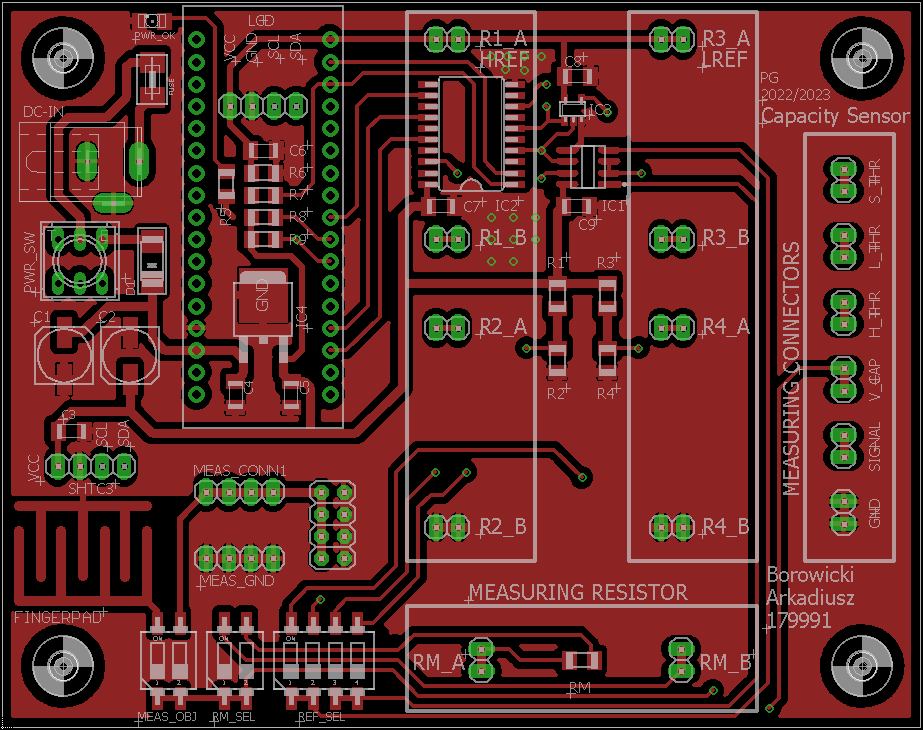
# DODATEK B – SCHEMAT IDEOWY





# DODATEK C – SCHEMAT MONTAŻOWY

Warstwa górna:



Warstwa dolna:

