



Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Instytut Systemów Elektronicznych

Łukasz Konrad Wolniak

Nr indeksu: 236623

Praca Inżynierska

System do pomiaru ilości cieczy w połączonych
zbiornikach o zdefiniowanych wymiarach.

Praca wykonana pod kierunkiem:
dr inż. Daniel Paczesny

Warszawa, 2015

System do pomiaru ilości cieczy w połączonych zbiornikach o zdefiniowanych wymiarach.

Streszczenie:

Celem pracy jest zbudowanie systemu pomiarowego do badania poziomu cieczy w połączonych zbiornikach. Zbiorniki połączone są w sposób umożliwiający przelewanie cieczy z jednego zbiornika do drugiego. Praca obejmuje przegląd i wybór metod pomiarowych oraz utworzenie działającego systemu wykorzystującego odpowiednie czujniki pomiarowe. Sprawdzenie poprawności działania systemu w różnych warunkach dokonywane jest na wcześniej zbudowanym stanowisku pomiarowym.

Measurement system of the amount of liquid in connected tanks with defined dimensions.

Abstract:

The aim of this project is to create a measurement system for measuring the level of liquid in connected tanks. Tanks are connected in the way enabling to transfer liquid from one tank to another. The work includes the review and selection methods of measurement and the creation of a working system using appropriate sensors. Checking the correctness of the system under different conditions is made on a pre-built bench.

Spis treści

1. Wstęp	4
2. Zakres pracy	5
3. Przegląd dostępnych rozwiązań	7
3.1. Metody kontaktowe.....	8
3.2. Metody bezkontaktowe	18
3.3. Porównanie metod pomiarowych.....	26
4. Wybrane rozwiązania problemu	28
4.1. Wybrane metody pomiarowe	28
4.1.1. Metoda ultradźwiękowa	28
4.1.2. Metoda wagowa.....	29
4.2. Czujniki pomiarowe i ich parametry	30
4.3. Mikrokontrolery	32
5. Skonstruowany system do pomiaru ilości wody.....	34
5.1. Płyta uruchomieniowa Raspberry PI.....	34
5.2. Płyta ewaluacyjna STM32F429i	35
5.2.1. Metoda ultradźwiękowa.....	35
5.2.2. Metoda wagowa.....	36
5.2.3. Wykonanie płytki drukowanej.....	40
5.3. Oprogramowanie mikrokontrolera STM32F429i	41
5.3.1. Metoda ultradźwiękowa.....	41
5.3.2. Metoda wagowa.....	42
5.4. Oprogramowanie do obserwacji wyników pomiaru	43
6. Analiza błędów i dokładności pomiarowych	45
7. Stanowisko pomiarowe	47
7.1 Projekt stanowiska pomiarowego	47
7.2. Opis zbudowanego stanowiska pomiarowego	50
8. Testy systemu pomiarowego.....	52
8.1. Przeprowadzone eksperymenty.....	52
8.2. Wyniki pomiarów.....	54
8.3. Kalibracja systemu pomiarowego	61
9. Podsumowanie	66
10. Bibliografia	67

1. Wstęp

Jednym z podstawowych pomiarów jest pomiar poziomu cieczy. Systemy monitorujące objętość substancji w zbiornikach można spotkać w każdym zakładzie produkcji, w wielu urządzeniach codziennego użytku czy też w naszych domach. Kiedyś dokonywanie pomiarów poziomu było trudnym i pracochłonnym zajęciem. Dziś z pomocą przychodzi zaawansowana elektronika oraz możliwość szybkiego przetwarzania informacji przy pomocy mikrokontrolerów.

Pomiary ilości substancji mają bardzo duże znaczenie i są niezbędne do działania wielu urządzeń. Przepelnienie czy brak cieczy w zbiorniku mogą spowodować ogromne konsekwencje takie jak uszkodzenia niekiedy bardzo drogiego sprzętu lub zalanie budynku. Znajomość ilości cieczy w zbiorniku pozwala planować i optymalizować pracę urządzeń. W wyniku zwiększania dokładności i niezawodności czujników powstają produkty lepszej jakości oraz zmniejszają się koszty ich produkcji.

Dzięki współczesnej technologii możliwe jest tworzenie zaawansowanych systemów pomiarowych, które w sposób ciągły dokonują pomiaru poziomu danej substancji w zbiorniku. Wyniki mogą być natychmiast przetwarzane i wykorzystywane do prawidłowego działania innych urządzeń.

Tematem pracy jest zbudowanie systemu pomiarowego mierzącego ilość cieczy w połączonych zbiornikach o zdefiniowanych wymiarach. Ilość substancji można przedstawić jako objętość, wagę lub poziom cieczy w zbiorniku. Zbiorniki połączone są w sposób umożliwiający przenoszenie substancji z jednego zbiornika do drugiego np. przy pomocy pompki. Znane są wymiary zbiorników: kształt, długość, szerokość i wysokość każdego z nich. Tworzony system do pomiaru poziomu cieczy może mieć zastosowanie w urządzeniach sprzątających powierzchnie przemysłowe. Pojemność zbiorników rzędu 30 litrów jest wystarczająca do pracy urządzenia przez kilka godzin.

System do pomiaru powinien być odporny na wszelkie niesprzyjające warunki występujące w trakcie jego działania. Pomiar ciągły wymaga przyjęcia odpowiedniej metody pomiarowej, która bez względu na okoliczności nie przerwie pracy lub pod wpływem losowych zdarzeń nie zmieni wyników odczytu lub dokładności pomiaru.

2. Zakres pracy

Celem pracy jest stworzenie systemu do pomiaru ilości substancji w połączonych zbiornikach o zdefiniowanych wymiarach.

Praca obejmuje:

- Przegląd dostępnych rozwiązań oraz układów elektronicznych umożliwiających w sposób ciągły dokonywać pomiaru ilości cieczy w zbiorniku.
- Wybór odpowiednich metod pomiarowych.
- Zbudowanie poprawnie działającego systemu pomiarowego, składającego się z przetwornika - czujnika, systemu elektronicznego z mikroprocesorem sterującym oraz aplikacji komputerowej monitorującej wyniki.
- Sprawdzenie poprawności działania systemu w postaci testów na zbudowanym stanowisku pomiarowym.

W celu realizacji celu pracy zostało przyjętych kilka założeń projektowych:

- Do rozwiązania problemu użyte są dwie wybrane metody pomiarowe: kontaktowa i bezkontaktowa.
- Mierzoną cieczą jest woda. Bieżąca ilość cieczy przedstawiana jest w litrach.
- Zbiorniki są w kształcie prostopadłościanów o znanej podstawie i wysokości. Ich pojemność to około 30 litrów.
- Przelewanie wody odbywa się za pomocą pompki lub naczynia o znanej objętości cieczy.

Wymagania funkcjonalne:

- Pomiar odbywa się w sposób ciągły – system pokazuje aktualny poziom cieczy w zbiornikach.
- System pomiarowy jest odporny na ruch cieczy w zbiorniku oraz na obecność piany na powierzchni.
- Dokładność pomiaru na poziomie 5%.
- Rozdzielczość pomiaru na poziomie 0,3 litra.
- Odczyt poziomu odbywa się kilkadziesiąt razy na minutę.

System może znaleźć zastosowanie dla zbiorników w robocie sprzątającym, w którym wymagany jest pomiar ilości czystej wody w zbiorniku. Brudna woda podczas sprzątania trafia do drugiego zbiornika. Robot podczas pracy przemieszcza się, co powoduje ruch cieczy w zbiorniku. Do czyszczenia mogą zostać wykorzystane środki chemiczne powodujące powstawanie piany. Przetestowane rozwiązania nie uwzględniają wszystkich potrzeb konstrukcyjnych, a jedynie wskazują na możliwość zastosowania wybranych metod pomiarowych.

3. Przegląd dostępnych rozwiązań

Powstało wiele metod pomiarowych wykorzystywanych do pomiaru poziomu cieczy. Pierwsze układy wykorzystywały elementy mechaniczne takie jak pływak. Te nowsze korzystają ze znacznie bardziej zaawansowanych technologii.

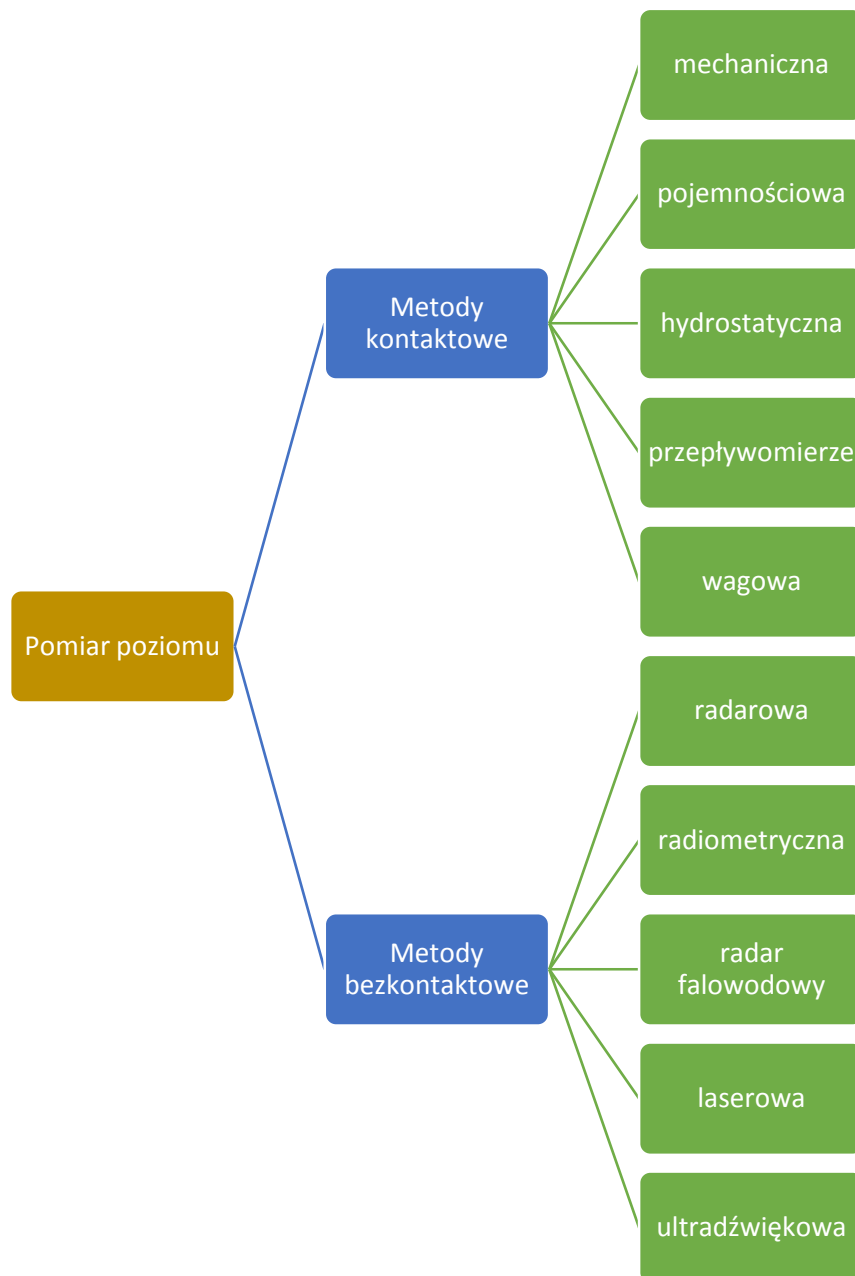
Pomiar poziomu można podzielić na dwa rodzaje: sygnalizację poziomu oraz pomiar ciągły wskazujący aktualny stan substancji w zbiorniku.[1]

Sygnalizacją nazywamy pomiar, który wskazuje czy na danym poziomie, na którym umieszczony jest czujnik pomiarowy jest obecna substancja. Jeśli czujnik wykryje obecność cieczy, na wyjściu sygnał ma wartość inną niż w przypadku braku obecności cieczy. Czujniki sygnalizujące obecność substancji zazwyczaj umieszczone są na dnie lub na górze zbiornika – sygnalizują wtedy przepełnienie lub brak substancji w zbiorniku.

Pomiar ciągły ma za zadanie pokazać ile substancji znajduje się w zbiorniku. Wraz ze wzrostem lub spadkiem ilość mierzonych substancji następuje zmiana wskazań systemu pomiarowego.

Wybór odpowiedniej metody pomiarowej jest uzależniony od bardzo wielu czynników. Metody pomiarowe różnią się między sobą sposobem pomiaru, parametrami oraz ceną. Pod uwagę należy wziąć to z jaką substancją mamy do czynienia.

Na rynku dostępnych jest wiele różnych czujników pomiarowych. Możemy podzielić je na kontaktowe: takie, które mają bezpośredni kontakt z badaną substancją oraz bezkontaktowe: pomiar dokonywany jest bez kontaktu z cieczą. Podział przedstawia rysunek 3.1.



Rysunek 3.1. Metody pomiaru poziomu

3.1. Metody kontaktowe

Metody kontaktowe posiadają sondy pomiarowe umieszczone w badanej substancji. Należy więc zwrócić szczególną uwagę na rodzaj mierzonej substancji, ponieważ niektóre z nich mogą negatywnie wpłynąć na wynik pomiaru lub żywotność systemu pomiarowego.

a) Metoda mechaniczna

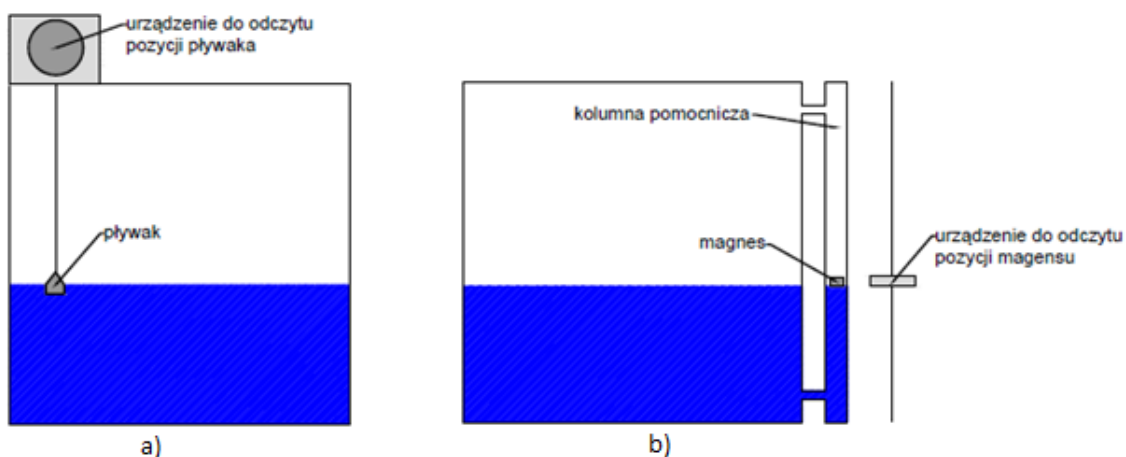
Najprostszym sposobem pomiaru poziomu cieczy w zbiorniku jest metoda wykorzystująca do pomiaru pływak. Pływak jest przedmiotem o ciężarze pośrednim między ciężarem cieczy, a gazem jaki wypełnia zbiornik. Dzięki tej właściwości pływak opada przez warstwę gazu i unosi się na powierzchni cieczy. Układ pomiarowy wyposażony jest w urządzenie mechaniczne pozwalające odczytywać obecną pozycję pływaka.[2]

Największym problemem w stworzeniu takiego systemu jest odczyt aktualnej pozycji pływaka z odpowiednią dokładnością. Wykorzystywane w tym celu są komponenty mechaniczne takie linki, taśmy, koła prasowe oraz koła zębate. Popularne stały się również układy wyposażone w pływaki magnetyczne znacznie ułatwiające dokładny pomiar poziomu.

Wcześniejsze przetworniki do pomiaru pozycji pływaka używały sieci rezystorów i kontaktronów. Sygnał wyjściowy z takiego przetwornika zmieniał się w dyskretnych krokach. W przeciwieństwie do systemów pozwalających na ciągły pomiar poziomu układy te nie są w stanie pokazywać wartości poziomów między zaprojektowanymi wartościami.

Preferowanym zamiennikiem wyżej przedstawionej metody są magnetyczne wskaźniki poziomu. Są one podobne do pływaków, ale przekaz informacji o aktualnej pozycji odbywa się magnetycznie. Ciecz unosząca silny magnes porusza się w pomocniczej kolumnie dołączonej do zbiornika dwoma połączeniami. Kolumna ogranicza ruch pływaka na boki tak, że znajduje się on zawsze w bocznej części zbiornika. Kiedy poziom cieczy zmienia się magnes znajdujący się na powierzchni cieczy również zmienia swoje położenie, a tym samym zapewnia wskazanie poziomu. System może działać tylko wtedy gdy zbiornik i pomocnicza kolumna wykonane są z materiału innego niż metal. Rysunek 3.2 przedstawia różnice między pomiarem poziomu za pomocą zwykłego pływaka, a pływaka wykorzystującego do pomiaru magnes.[3]

Producenci dostarczają konstrukcje pływające dostosowane do danej cieczy dzięki czemu wskaźniki magnetyczne mogą działać w wysokich temperaturach i przy dużym ciśnieniu.



Rysunek 3.2. Pomiar poziomu cieczy metodą mechaniczną: a) układ z pływakiem b) układ wykorzystujący do pomiaru magnes

Przykładowym czujnikiem pływakowym jest czujnik siedmiopoziomowy oferowany przez firmę EIEWIN (rys.3.3).[12]

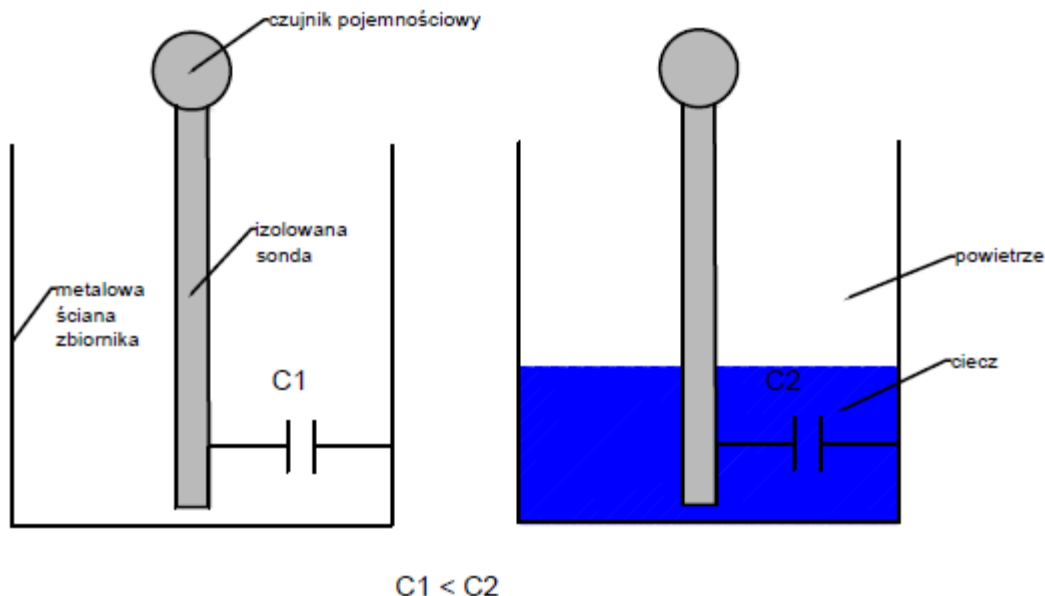


Rysunek 3.3. Czujnik pływakowy firmy EIEWEN

zakres pomiarowy	do 2m
dokładność pomiaru	15%
zasilanie	do 30V AC DC
prąd	0,1A
powtarzalność	1cm
wyjście	zwarcie lub rozwarcie

b) Metoda pojemnościowa

Zasada pomiaru poziomu metodą pojemnościową oparta jest na zmianie pojemności kondensatora zbudowanego z izolowanej elektrody i ściany zbiornika (lub elektrody odniesienia w zbiorniku niezbudowanym z metalu). Pojemność elektryczna tak zbudowanego kondensatora zależy od poziomu cieczy w zbiorniku. W zależności od wypełnienia zbiornika przestrzeń między okładkami kondensatora wypełniona jest powietrzem lub mierzoną substancją, w wyniku czego zmienia się względna przenikalność elektryczna dielektryka.[4]. Zasadę działania przedstawia rysunek 3.4.



Rysunek 3.4. Pomiar poziomu cieczy metodą pojemnościową, w pustym zbiorniku pojemność kondensatora utworzonego przez ścianę zbiornika i sondę jest mniejsza niż w przypadku zbiornika w wodę

Sytuacja jest analogiczna jak w przypadku prostego kondensatora, który składa się z dwóch płaskich elektrod oddzielonych od siebie izolatorem takim jak ciało stałe, ciecz, gaz czy próżnia. Izolator ten nazywany jest dielektrykiem. Pojemność takiego kondensatora wyraża się wzorem (3.1).

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot S}{d} \quad (3.1)$$

Gdzie: C – pojemność kondensatora, ϵ_0 - stała przenikalności elektrycznej próżni, ϵ_r – wartość względnej przenikalności dielektryka znajdującego się między okładkami, S - powierzchnia okładki kondensatora, d – odległość między okładkami

W przypadku kondensatora cylindrycznego pojemność wyraża się wzorem 3.2.

$$C = \frac{2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot l}{\ln\left(\frac{R}{l}\right)} \quad (3.2)$$

Gdzie: C – pojemność kondensatora, ϵ_0 - stała przenikalności elektrycznej próżni, ϵ_r – wartość względnej przenikalności dielektryka znajdującego się między okładkami, R - promień okładek kondensatora, l – długość kondensatora

Metoda pojemnościowa ma wiele zalet: można ją wykorzystać do pomiaru różnych substancji (ciecze, materiały sypkie, zawiesiny), wymaga minimalnej konserwacji, łatwa w instalacji, możliwość zastosowania dla różnych wielkości zbiorników.

Wadą metody pojemnościowej jest niemożliwość jej zastosowania w przypadku substancji o bardzo małej stałej dielektrycznej. Różnica stałej dielektrycznej takich substancji, a powietrza może powodować zbyt małą różnicę w pojemności i utrudnić odczyt poziomu.

Przykładowym czujnikiem pojemnościowym jest czujnik VEGACAL 65 (rys. 3.5).[13]



zakres pomiarowy	3m
zasilanie	20V DC
wyjście	analogowe 4-20mA
dokładność	1,5%
temperatura pracy	-20 do 60°
maksymalne ciśnienie	20 barów

Rysunek 3.5. Czujnik pojemnościowy VEGACAL 65

c) Metoda hydrostatyczna

Pomiar metodą hydrostatyczną polega na pomiarze ciśnienia jakie wywiera słup cieczy o bieżącej wysokości na dno zbiornika. Wzrost ciśnienia pozwala na ustalenie jaki jest poziom cieczy w zbiorniku. Do ustalenia poziomu na podstawie odczytanej wartości ciśnienia konieczna jest kalibracja systemu pomiarowego.[5]

Ciśnienie hydrostatyczne można wyrazić wzorem 3.3.

$$P = h \cdot g \cdot \rho \quad (3.3)$$

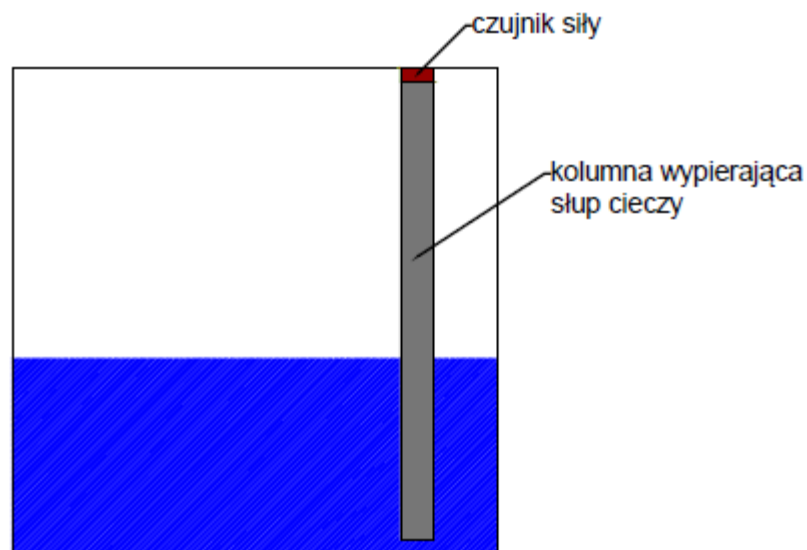
gdzie: P – ciśnienie hydrostatyczne słupa cieczy, h – poziom cieczy, g – przyspieszenie ziemskie, ρ – gęstość cieczy

Są trzy najważniejsze metody pomiaru poziomu metodą hydrostatyczną.

Pierwszy sposób opiera swoje działanie na prawie Archimedesesa. W zbiorniku z cieczą umieszczona jest kolumna wykonana z materiału, którego gęstość jest większa niż gęstość badanej cieczy. Kolumna rozciąga się od najniższego poziomu, który chcemy

zmierzyć aż do najwyższego poziomu, ale nie dotyka dna. Nad kolumną znajduje się czujnik siły, który utrzymuje kolumnę w górze przeciwdziałając sile grawitacji.

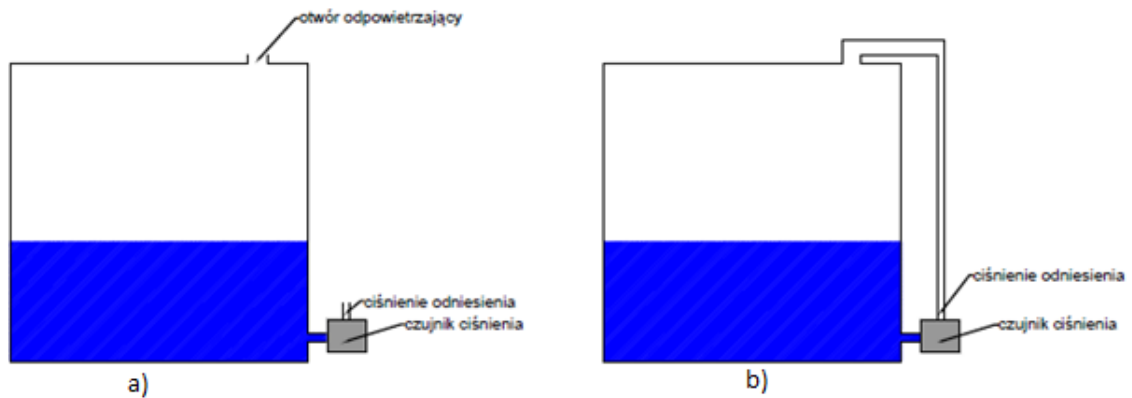
Gdy poziom cieczy wzrasta kolumna wypiera objętość płynu równą powierzchni przekroju poprzecznego kolumny pomnożoną przez poziom płynu napierającego na kolumnę. Siła wyporu naciska na górę czujnika zmniejszając tym samym siłę potrzebną do utrzymania kolumny. Czujnik podłączony do przetwornika monitoruje zmiany nacisku odczytując tym samym poziom cieczy w zbiorniku (rys. 3.6).



Rysunek 3.6. Pomiar poziomu metodą hydrostatyczną wykorzystującą prawo Archimedesesa

Drugim sposobem jest pomiar różnicy ciśnienia w dolnej części zbiornika i ciśnienia w zbiorniku (ponad poziomem cieczy). Różnica ciśnienia hydrostatycznego jest równa gęstości cieczy pomnożonej przez wysokość słupa cieczy w zbiorniku. Jako odniesienie jest wykorzystane ciśnienie atmosferyczne. Wtedy na górze zbiornika znajduje się odpowietrznik, który utrzymuje ciśnienie w zbiorniku równe ciśnieniu atmosferycznemu. (rys. 3.7a)

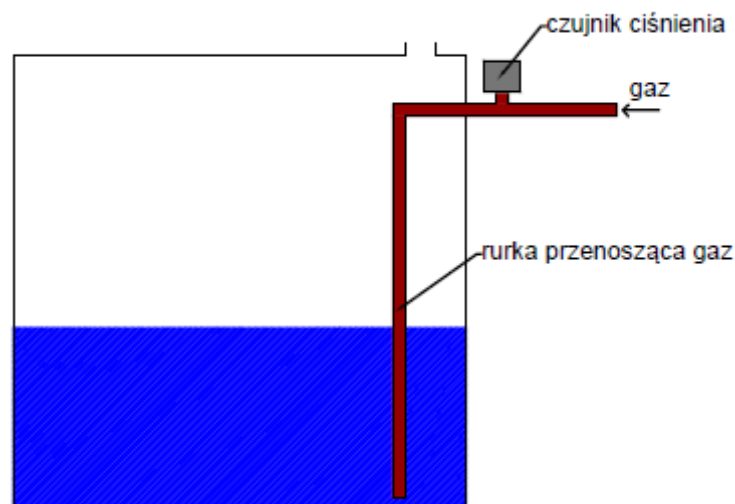
Czujniki mierzące różnicę ciśnień można stosować w zbiornikach niewentylowanych. W takim przypadku port czujnika odpowiadający za ciśnienie odniesienia należy połączyć z otworem w zbiorniku znajdującym się powyżej maksymalnego poziomu cieczy. Wtedy ciśnieniem odniesienia będzie ciśnienie wytworzone w zbiorniku ponad poziomem cieczy. (rys. 3.7b)



Rysunek 3.7. Pomiar poziomu cieczy metodą hydrostatyczną: a) ciśnieniem odniesienia jest ciśnienie atmosferyczne, b) ciśnieniem odniesienia jest ciśnienie panujące w zbiorniku

Trzecim sposobem pomiaru poziomu wykorzystującym pomiar ciśnienia jest metoda bąbelkowa. W zbiorniku umieszczona jest rurka, która ma swój koniec blisko dna zbiornika. Rurka przenosi gaz na dno zbiornika. Zazwyczaj gazem jest zwykle powietrze, ale w warunkach, w których mogłoby dojść do reakcji pod wpływem powietrza jest użyty inny gaz.

Pomiar polega na pomiarze ciśnienia wprowadzanego gazu. Im większy poziom cieczy tym ciśnienie wprowadzanego gazu musi być większe. Gaz wprowadzany do zbiornika musi pokonać ciśnienie hydrostatyczne wywierane przez słup cieczy i wydostać się końcem rurki przy dnie. Ulatniający się gaz powoduje powstawanie bąbelków, stąd nazwa metody. Rysunek 3.8 przedstawia pomiar poziomu cieczy metodą bąbelkową.



Rysunek 3.8. Pomiar poziomu cieczy metodą bąbelkową.

Wadą rozwiązania jest to, że wprowadzany gaz może powodować osuszenie cieczy przy końcu rury, przez co może wytworzyć się ciśnienie wsteczne powodujące fałszywe

wyniki pomiaru. Należy zadbać o to aby otwór rurki na dnie zbiornika był zawsze w pełni otwarty.

Zaletą jest możliwość pomiaru poziomu z odległej lokalizacji. Czujniki nie muszą znajdować się blisko zbiornika z cieczą.

Przykładowy czujnik do pomiaru ciśnienia HONEYWELL 26PCCFA3D przedstawia rysunek 3.9.[14]



zakres pomiarowy	0-15 psi
Zasilanie	10V DC
Wyjście	Analogowe
temperatura pracy	-40 do 85°

Rysunek 3.9. Czujnik ciśnienia HONEYWELL 26PCCFA3D.

d) Przepływomierz

Za pomocą przepływomierzy można kontrolować ilość cieczy w zbiorniku. Znając objętość płynu jaki wlewamy do zbiornika wiemy ile cieczy znajduje się w tym zbiorniku.

Przepływomierz mierzy ilość cieczy jaka przepływa przez czujnik. Jest wiele rodzajów przepływomierzy. Zasada działania każdego z nich jest inna.

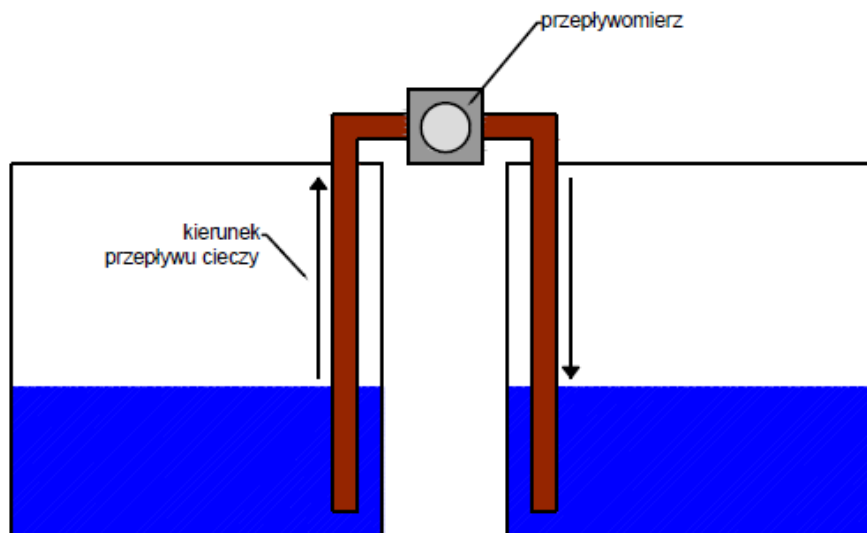
Przepływomierz masowy Coriolisa - przepływomierz mierzy masę produktu przepływającego przez układ pomiarowy. Podstawą działania jest efekt Coriolisa. Występowanie ruchu obrotowego i postępowego wiąże się z powstawaniem siły bezwładności nazywaną siłą Coriolisa. Siła ta posiada kierunek wyznaczony przez iloczyn wektorowy prędkości liniowej i obrotowej. Wartość tej siły jest proporcjonalna do masy cieczy przepływającej przez czujnik.

Przepływomierz wirowy – przyrząd pomiarowy, który mierzy jaka ilość medium przepływa przez daną powierzchnię prostopadłą do kierunku przepływu. Metoda ta opiera się na zjawisku powstawania wirów za ciałem nie opływowym. W czujniku znajduje się przegroda, która generuje zawirowania. Zawirowania te odrywają się od boków przegrody i unoszą wraz ze strumieniem. Czujnik dokonuje pomiaru

częstotliwości odrywania wirów, która jest proporcjonalna do średniej prędkości przepływu, czyli do strumienia objętości. Pomiar charakteryzuje się dużą dynamiką oraz niezależnością pomiaru od zmian ciśnienia i temperatury.[6]

Przepływomierz ultradźwiękowy – zasada działania opiera się na pomiarze różnicy przejścia fali ultradźwiękowej. Dwa czujniki pomiarowe generują naprzemiennie falę ultradźwiękową. Gdy nie przepływa żadna ciecz czasy przejścia fali w obu kierunkach są identyczne. Kiedy fala rozchodzi się przeciwnie do kierunku przepływu cieczy prędkość propagacji jest mniejsza niż gdy rozchodzi się zgodnie z kierunkiem przepływu. Prędkość cieczy jest proporcjonalna do różnicy czasów przejścia, dzięki czemu można obliczyć objętość przepływającej cieczy.

Rysunek 3.10 przedstawia pomiar poziomu cieczy za pomocą przepływomierza.



Rysunek 3.10. Pomiar poziomu cieczy za pomocą przepływomierza

Na rysunku 3.11 przedstawiony jest przepływomierz turbinowy PRZ-1800/L. [15]



napięcie zasilania	3,8-20V DC
pobór prądu	<8mA
dokładność	2%
powtarzalność	0,25%
temperatura pracy	-10 do 65 °C

Rysunek 3.11. Przepływomierz turbinowy PRZ-1800/L

e) Metoda wagowa

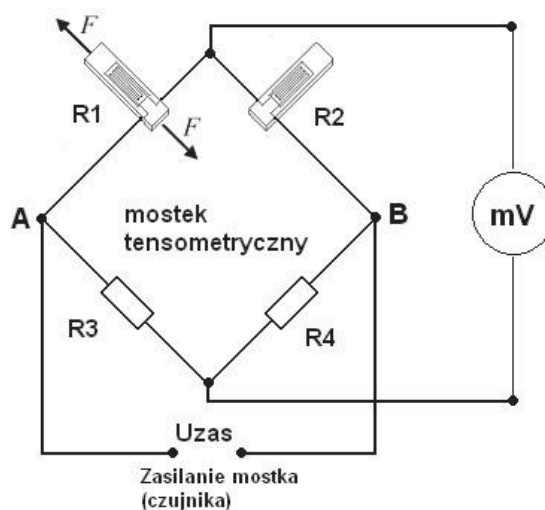
Ilość cieczy w zbiorniku można obliczyć znając wagę oraz rodzaj mierzonej substancji. Znajomość wymiarów zbiornika umożliwia dodatkowo obliczenie dokładnego poziomu cieczy.

Do pomiaru wagi potrzebne będą czujniki nacisku. W tym celu mogą zostać wykorzystane czujniki tensometryczne.

Tensometry oporowe działają w oparciu o właściwości fizyczne materiału, z którego zostały wykonane. Tensometr naklejany jest za pomocą specjalnego kleju na element, który ulega odkształceniu pod wpływem działania zewnętrznych sił. Materiał, z którego wykonany jest tensometr ulega identycznym odkształceniom co element, na którym został umieszczony.[7]

Czujniki tensometryczne mogą być umieszczone w specjalnej folii (tensometry foliowe). Osoba tworząca układ pomiarowy nakleja taki czujnik na element, który ulega odkształceniom, a następnie za pomocą stworzonego układu pomiarowego dokonuje pomiaru rezystancji.

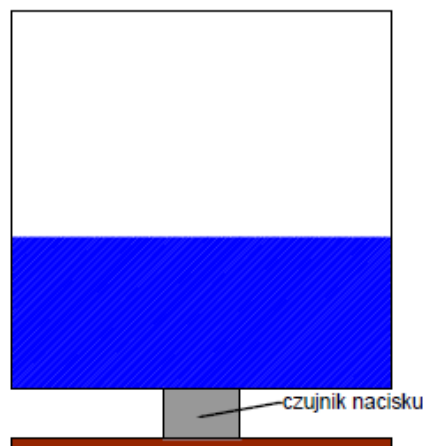
Czujniki tensometryczne można znaleźć również w gotowych belkach tensometrycznych przygotowanych do pomiaru wagi. Czujnik znajduje się u układzie mostka. Schemat mostka tensometrycznego możliwego do wykorzystania w belce tensometrycznej przedstawia rysunek 3.12.



Rysunek 3.12. Mostek tensometryczny stosowany w belkach tensometrycznych

Jeżeli na wejście mostka tensometrycznego zostanie podane napięcie to na wyjściu jest napięcie zależne od zmian rezystora R_I czyli tensometru.

Rysunek 3.13 przedstawia pomiar poziomu cieczy metodą wagową.



Rysunek 3.13. Pomiar poziomu cieczy metodą wagową

Na rysunku 3.14 przedstawiona jest belka tensometryczna BTENS-N1-035.[16]



napięcie zasilania	5-12V DC
zakres pomiarowy	0-35 kg
wyjście	2mV na każdy 1V zasilania
temperatura pracy	-20-60°C

Rysunek 3.14. Belka tensometryczna BTENS-N1-035

3.2. Metody bezkontaktowe

Czujnik pomiarowy w poprawnie działającym systemie pomiarowym nie ma kontaktu z mierzoną cieczą. Jest umieszczony najczęściej nad zbiornikiem z substancją. Pomiar wykonywany jest w danym punkcie powierzchni, dlatego mierzone substancje powinny mieć odpowiednią gęstość, taką aby ich powierzchnia była płaszczyzną.

Jako, że czujnik nie ma kontaktu z mierzoną substancją możliwości uszkodzenia są mniejsze niż w przypadku metod kontaktowych. Metody te są dobrym wyborem dla substancji agresywnych takich jak np. kwasy. Mogą one być skuteczne również dla

pomiarów ilości wody. Takie metody gwarantują długą żywotność systemu pomiarowego.

Metody bezkontaktowe opierają się na pomiarze czasu przelotu impulsów elektromagnetycznych lub fal ultradźwiękowych odbitych od przeszkody, jaką jest powierzchnia cieczy. Jeśli założymy, że znane są wymiary zbiornika do obliczenia objętości cieczy wystarczy znajomość prędkości dźwięku lub impulsu elektromagnetycznego w powietrzu.

a) Metoda radarowa:

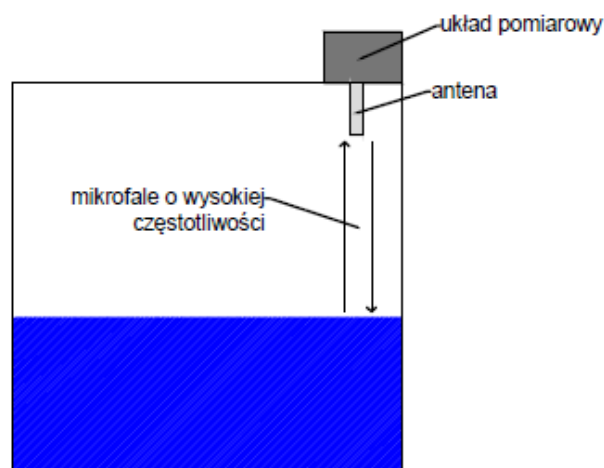
Pomiar dokonywany jest na podstawie czasu przelotu impulsów mikrofalowych o częstotliwości 6-78 GHz emitowanych przez antenę. Impulsy odbijane są od powierzchni na skutek zmiany impedancji falowej.

Znajomość wymiarów zbiornika pozwala w łatwy sposób obliczyć poziom badanej substancji. Po wyznaczeniu czasu przelotu impulsów mikrofalowych z czujnika do przeszkody i z powrotem wyznaczana jest odległość czujnika od przeszkody na podstawie wzoru 3.4.

$$d = c \cdot \frac{t}{2} \quad (3.4)$$

Gdzie: d – odległość czujnika od powierzchni cieczy, c – prędkość światła (300000 km/s), t – czas otrzymany podczas pomiaru

Rysunek 3.15 przedstawia pomiar poziomu cieczy metodą radarową.



Rysunek 3.15. Pomiar poziomu cieczy metodą radarową

W celu ochrony czujników pomiarowych stosuje się osłony z różnych materiałów, które skutecznie zapobiegają nadmiernemu zabrudzeniu systemów antenowych. Wykorzystywane są również pneumatyczne układy czyszczenia. Sondy radarowe mogą pracować w dużym zakresie temperatur: od -60 nawet do 400 stopni Celsjusza.

Ten sam system pomiarowy, który jest wykorzystywany do pomiaru poziomu materiałów sypkich może być również wykorzystany do pomiaru ilości cieczy w zbiorniku. Jest to więc dobre rozwiązanie dla osób potrzebujących systemu badającego zarówno poziom cieczy jak i materiałów sypkich. Zastosowywanie tych samych czujników pomiarowych może w znaczący sposób ułatwić stworzenie odpowiedniego systemu pomiarowego oraz jego naprawę w razie awarii.[8]

Na rysunku 3.16 przedstawiony jest czujnik radarowy Sitrans LR200.[17]



zakres pomiarowy	0,3-20m
zasilanie	24 V DC
wyjście	4-20 mA
maksymalne ciśnienie	3 bary
dokładność	0,1%
temperatura pracy	-40 do 200°C

Rysunek 3.16. Czujnik radarowy Sitrans LR200

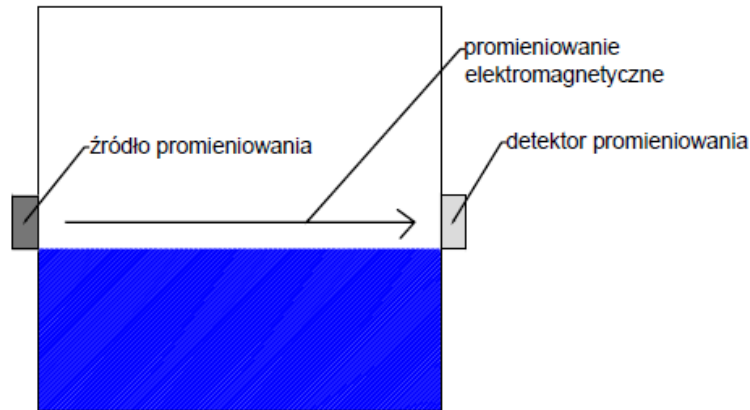
b) Metoda radiometryczna

Pomiar opiera się na absorpcji promieniowania przechodzącego przez mierzoną substancję. Podczas pomiaru większość promieniowania ulega absorpcji.

Na jednej ścianie zbiornika umieszczone jest źródło promieniowania, na drugiej przeciwległej ścianie na tej samej wysokości znajduje się detektor promieniowania. Źródło promieniowania oraz detektor umieszczone są na zewnątrz zbiornika. (rys. 3.17). Zwiększenie ilości cieczy ponad poziom detektora powoduje wzrost pochłaniania promieniowania przez substancję w zbiorniku, co powoduje odpowiednie wskazanie układu odpowiedzialnego za odczyt poziomu. Natężenie promieniowania rejestrowane przez układ zmienia się wraz z poziomem cieczy w zbiorniku.

Jako źródło promieniowania zazwyczaj używane są izotopy cezu i kobaltu.

Metoda może być użyta do pomiaru cieczy oraz materiałów sypkich. Szczególnie przydatna jest w przypadku gdy substancja umieszczona w zbiorniku jest silnie agresywna i umieszczenie czujników pomiarowych w zbiorniku jest niemożliwe.[9]



Rysunek 3.17. Pomiar poziomu cieczy metodą radiometryczną

Na rysunku 3.18 przedstawiony jest czujnik izotopowy LB440.[18]



zakres pomiarowy	0,3-20m
zasilanie	24V DC
wyjście	4-20 mA

Rysunek 3.18. Czujnik izotopowy LB440

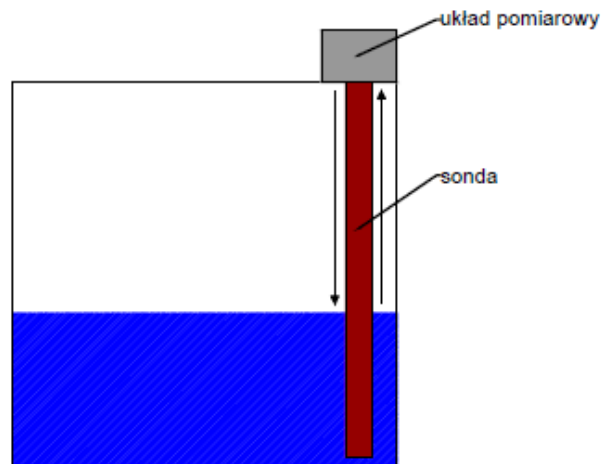
c) Radar falowodowy

Zasada działania bazuje na pomiarze czasu przelotu impulsów elektromagnetycznych o wysokiej częstotliwości wysyłanych wzdłuż falowodu. Gdy impulsy napotkają zmianę impedancji falowej (powierzchnię cieczy) następuje ich częściowe lub całkowite odbicie. Określenie poziomu substancji w zbiorniku odbywa się przy wykorzystaniu informacji o długości falowodu.

Sonda radarowa umożliwia pomiary zarówno cieczy jak i substancji sypkich. Na działanie czujników nie mają wpływu kształt usypania surowców (powierzchnia) oraz

kąt odbicia fali elektromagnetycznej od powierzchni. Pomiary mogą być wykonywane nawet w dużym zapyleniu zbiornika oraz przy dużym ciśnieniu. [8]

Rysunek 3.19 przedstawia pomiar poziomu cieczy przy wykorzystaniu radaru falowodowego.



Rysunek 3.19. Pomiar poziomu cieczy wykorzystujący radar falowodowy

Przykładowe czujniki:

Na rysunku 3.20 przedstawiony jest radar falowodowy FMP50.[19]



zakres pomiarowy	0,3-12m
wyjście	4-20 mA
temperatura pracy	-20 do 80°C
ciśnienie	-1 do 6 barów

Rysunek 3.20. Radar falowodowy FMP50

d) Metoda laserowa

Wiązka impulsów świetlnych emitowana jest przez czujnik laserowy, następnie odbija się od powierzchni mierzonej substancji. Powracająca wiązka zarejestrowana jest przez czujnik. Pomiar dokonywany jest na podstawie czasu przelotu wiązki światła od

czujnika do przeszkody. Zmierzona w ten sposób odległość oraz znajomość wymiarów zbiornika pozwala obliczyć poziom i ilość substancji w zbiorniku.

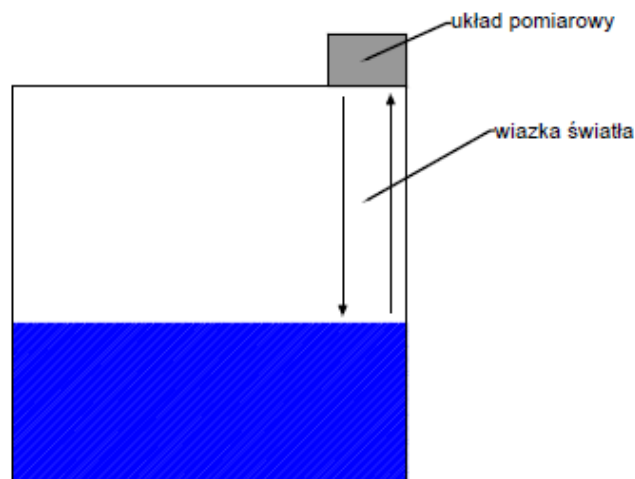
Czujniki laserowe charakteryzują się dużą szybkością odpowiedzi. Na wynik pomiaru nie mają wpływu stała dielektryczna materiału, czy szybkość rozchodzenia się dźwięku w gazie.

Istotne jest to, że w przypadku pomiarów laserowych pomiar może być dokonywany przez szklaną ścianę zbiornika. Umożliwia to zamontowanie czujnika poza zbiornikiem.

Zaletą czujników laserowych jest możliwość użycia metody z ich wykorzystaniem w przypadku bardzo małych zbiorników.

Wadą rozwiązania z wykorzystaniem lasera jest zmniejszenie intensywności wiązki laserowej na skutek zabrudzenia nadajnika i odbiornika. Wymagane jest czyszczenie czujnika laserowego. Pewnym rozwiązaniem jest umieszczenie czujnika w ochronnej rurce. Problemem jest również stan i rodzaj powierzchni mierzonej substancji. Piana może powodować błędy w odczycie, ponieważ wiązka laserowa może ulec odbiciu od piany, a nie od mierzonej cieczy. Niekorzystne są także duże ciśnienie oraz zapylenie w zbiorniku. Wadą rozwiązania jest również wysoka cena.

Rysunek 3.21 przedstawia pomiar poziomu cieczy metodą laserową.



Rysunek 3.21. Pomiar poziomu cieczy metodą laserową

Na rysunku 3.22 przedstawiony jest czujnik laserowy QS18VP6LDQ8.[20]



zasilanie	10-30 V DC
zakres pomiarowy	0-300mm
wyjście	4-20 mA
temperatura pracy	-10 do 50°C
czas odpowiedzi	0,7ms
powtarzalność	130us

Rysunek 3.22. Laserowy czujnik QS18VP6LDQ8

e) Metoda ultradźwiękowa

Metoda polega na pomiarze odległości czujnika ultradźwiękowego od powierzchni wody. Czujnik ultradźwiękowy emituje impulsy ultradźwiękowe o częstotliwości kilkadziesiąt kHz w regularnych odstępach czasu. Po napotkaniu przeszkody impuls zostaje od niej odbity i trafia z powrotem do czujnika.

Dystans wyznaczany jest na podstawie czasu po jakim impuls wraca do czujnika. Zadanie polega więc na dokładnym pomiarze tego czasu i przeliczeniu zmierzonej wartości na odległość.

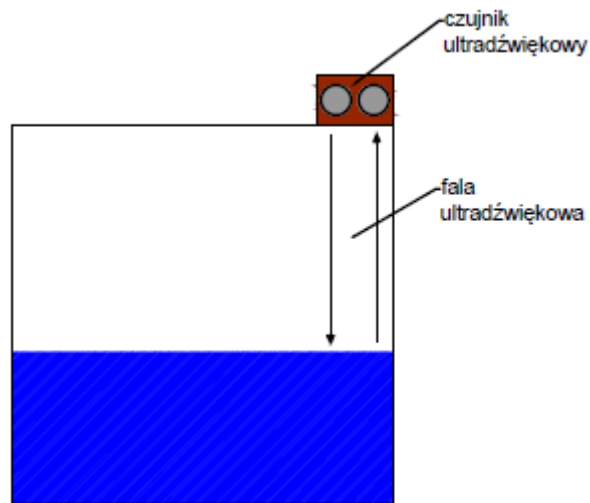
Jako, że znana jest prędkość dźwięku w powietrzu (340m/s), mając zmierzony czas można za pomocą wzoru 3.5 obliczyć przebytą przez ultradźwięki drogę.

$$d = \frac{v \cdot t}{2} \quad (3.5)$$

Gdzie: d – odległość między czujnikiem, a powierzchnią wody, v – prędkość dźwięku w powietrzu (340m/s), t – czas przelotu impulsu ultradźwiękowego

Czas przelotu (t) impulsów odbitych jest wprost proporcjonalny do odległości (d) od powierzchni wody. Ponieważ droga jest pokonywana dwa razy (do powierzchni cieczy i z powrotem) wynik jest podzielony przez 2.

Rysunek 3.23 przedstawia pomiar poziomu cieczy za pomocą metody ultradźwiękowej.



Rysunek 3.23. Pomiar poziomu cieczy metodą ultradźwiękową

Na rysunku 3.24 przedstawiony jest czujnik ultradźwiękowy HC-SR04. [21]



napięcie zasilania	5V DC
średni pobór prądu	15 mA
zakres pomiarowy	2-400 cm
Wyjście	sygnał częstotliwościowy
częstotliwość pracy	40 kHz
Rozdzielczość	0,3cm

Rysunek 3.24. Czujnik ultradźwiękowy HC-SR04

3.3. Porównanie metod pomiarowych

Każda metoda ma swoje wady i zalety. Przy wyborze należy zwrócić uwagę na dostępność czujników, łatwość instalacji systemu pomiarowego, cenę rozwiązania oraz zakres i dokładność pomiarową. W tabeli 3.1 i 3.2 przedstawione jest porównanie metod pomiarowych pod względem parametrów czujników. Cena, dokładność pomiaru i zakres pomiarowy dotyczą przedstawionych wcześniej czujników, które służą jako przykładowe do każdej metody.

Tabela 3.1. Parametry kontaktowych metod pomiaru poziomym.

	metody kontaktowe				
	mechaniczna	pojemnościowa	hydrostatyczna	przeływomierz	wagowa
dostępność czujników	średnia	łatwa	łatwa	średnia	łatwa
instalacja systemu	łatwa	łatwa	średnia	średnia	trudna
cena	kilkadziesiąt zł	kilkaset zł	około 100zł	od 30zł	od 60zł
dokładność pomiaru	15%	1,5%	-	2%	0,03%**
zakres pomiarowy	2m	3m	10m*	-	35kg

* zakres został obliczony na podstawie wzoru 3.3

** urządzenie jest klasy C3, co oznacza, że posiada 3000 działek

Tabela 3.2 Parametry bezkontaktowych metod pomiaru poziomym

	metody bezkontaktowe				
	radarowa	radiometryczna	radar fal.	laserowa	ultradźwiękowa
dostępność czujników	mała	mała	średnia	mała	duża
instalacja systemu	łatwa	średnia	łatwa	łatwa	łatwa
cena	powyżej 1000zł	-	-	kilkaset zł	od 10zł
dokładność pomiaru	0,1%	-	±2mm	-	±3mm
zakres pomiarowy	0,3-20m	0,3-20m	0,3-12m	0,3m	0-4m

Przy wyborze metody warto zwrócić uwagę na ograniczenia danej metody pomiarowej, które zostały zestawione w tabelach 3.3 i 3.4. [10,11]

Tabela 3.3. Ograniczenia metod kontaktowych*

	metody kontaktowe				
	mechaniczna	pojemnościowa	hydrostatyczna	przepływomierz	wagowa
wysoka temperatura	+/-	+	+	+/-	+
wysokie ciśnienie	+/-	+	+	+/-	+
piana	+	+/-	+	+	+
zmienna gęstość substancji	-	+	-	-	-
duża lepkość substancji	-	+/-	-	-	+
osady	+	+/-	-	-	+
mały zbiornik	+/-	+	+/-	+	+
szybkość działania	+/-	+	+	+	+
para	+	+/-	+	+	+
zapylenie	+	+	+/-	+	+

Tabela 3.4. Ograniczenia metod bezkontaktowych*

	metody bezkontaktowe				
	radarowa	radiometryczna	radar falowodowy	laserowa	ultradźwiękowa
wysoka temperatura	+	+	+	+	+
wysokie ciśnienie	+	+	+	+	+
piana	+/-	+/-	+	-	+/-
zmienna gęstość substancji	+	+	+	+	+
Duża lepkość substancji	+	+	-	+	+
osady	+	+	-	+/-	+
mały zbiornik	+/-	+	+/-	+	+/-
szybkość działania	+/-	+	+/-	+	+/-
para	+/-	+/-	+	-	+/-
zapylenie	+	+/-	+	-	+/-

*zastosowane oznaczenia: + metoda polecana, - metoda niepolecana, +/- należy zwrócić uwagę na ograniczenia metody

4. Wybrane rozwiązania problemu

4.1. Wybrane metody pomiarowe

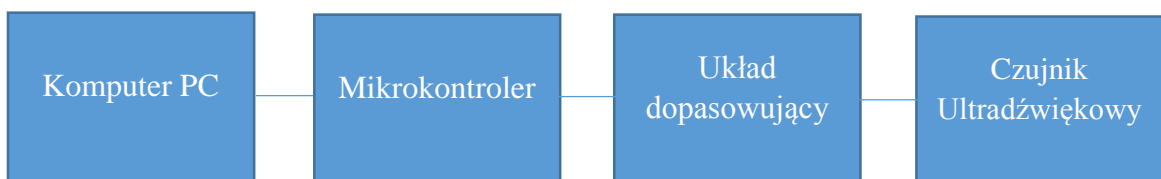
Po przeanalizowaniu wymagań projektowych oraz analizie dostępnych metod pomiarowych dokonano wyboru dwóch metod pomiarowych: **metody ultradźwiękowej** oraz **metody wagowej**. Wyboru dokonano ze względu na parametry czujników, dostępność czujników pomiarowych, łatwości instalacji oraz zakres pomiarowy. Ważna była również cena rozwiązania.

4.1.1. Metoda ultradźwiękowa

Zasada działania metody pomiarowej opisana jest w rozdziale 3.2.e.

Do budowy systemu pomiarowego wykorzystującego metodą ultradźwiękową zastosowany został czujnik ultradźwiękowy opisany w dalszej części pracy oraz układ, który przetwarza dane z czujnika na odległość, a następnie na poziom cieczy w zbiorniku. Po dokonanych pomiarze na wyjściu jest sygnał o czasie proporcjonalnym do zmierzonej odległości. Do sterowania czujnikiem ultradźwiękowym i przetwarzania danych wykorzystany został mikrokontroler. W zależności od posiadanego czujnika pomiarowego i mikrokontrolera konieczne było użycie dodatkowego układu dopasowującego.

Schemat blokowy systemu pomiarowego wykorzystującego metodę ultradźwiękową przedstawia rysunek 4.1.



Rysunek 4.1. Schemat blokowy systemu pomiarowego wykorzystującego metodę ultradźwiękową

Czujnik ultradźwiękowy umieszczony został na górze zbiornika. Pomędzy czujnikiem, a powierzchnią cieczy nie może być żadnej przeszkody. Sam montaż czujnika zależy od posiadanego zbiornika. Można w tym celu wykonać uchwyt na czujnik lub przymocować go do pokrywy zbiornika.

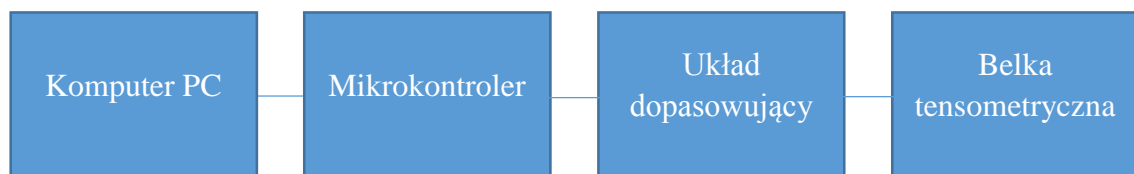
4.1.2. Metoda wagowa

Opis metody pomiarowej znajduje się w rozdziale 3.1.e.

Do pomiaru wagi metodą wagową wykorzystano gotową belkę tensometryczną. Do przetworzenia napięcia z wyjścia belki tensometrycznej użyto przetwornika analogowo-cyfrowego (ADC). Sterowanie układem ADC oraz przetworzenie danych z jego wyjścia na wagę cieczy zostało wykonane z użyciem mikrokontrolera. Niektóre mikrokontrolery posiadają wbudowane przetworniki analogowo-cyfrowe jednak ich parametry nie są zazwyczaj wystarczające dlatego skorzystano z zewnętrznego ADC.

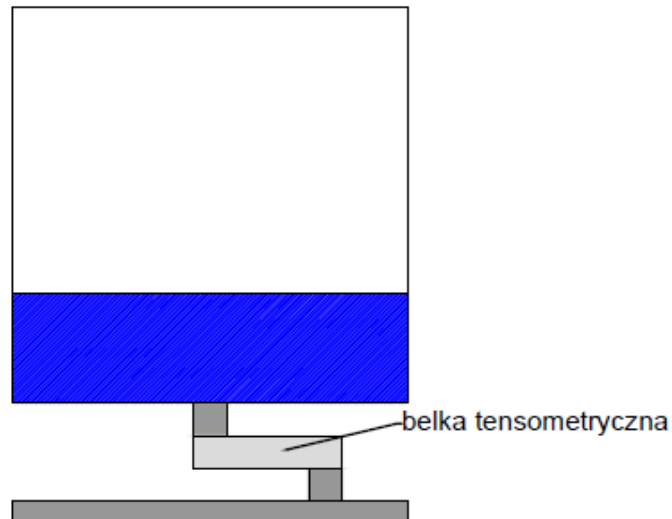
Czujnik tensometryczny zastosowany w belce tensometrycznej znajduje się w układzie mostka tensometrycznego (rys.3.12). Na wyjściu mostka tensometrycznego napięcie ma wartość proporcjonalną do mierzonej siły. Ponieważ zmiany rezystancji czujnika tensometrycznego są bardzo małe ($0,01-1\Omega$) na wyjściu napięcie jest rzędu kilku miliwoltów. Żeby takie napięcie mogło zostać przetworzone przez przetwornik analogowo-cyfrowy konieczne jest zastosowanie jednego stopnia wzmacniającego mierzonego sygnału.

Schemat blokowy systemu pomiarowego wykorzystującego metodę wagową przedstawia rysunek 4.2.



Rysunek 4.2. Schemat blokowy systemu pomiarowego wykorzystującego metodę ultradźwiękową

Do zamontowania zbiornika na belce tensometrycznej potrzebna jest specjalna konstrukcja, dzięki której belka tensometryczna będzie mogła uginać się pod wpływem ciężaru zbiornika z wodą (rys 4.3).



Rysunek 4.3. Sposób montowania zbiornika na belce tensometrycznej

4.2. Czujniki pomiarowe i ich parametry

a) Czujnik ultradźwiękowy HC-SR04

HC-SR04 jest gotowym układem do pomiaru odległości na podstawie czasu przelotu impulsu dźwiękowego. Wyposażony jest w nadajnik i odbiornik impulsów o częstotliwości 40kHz. Czujnik posiada wbudowany układ do pomiaru czasu jaki potrzebny jest do pokonania drogi do przeszkody i z powrotem. Parametry czujnika znajdują się w tabeli, więcej szczegółów można znaleźć w dokumentacji.

Czujnik przedstawiony jest na rysunku 4.4. W tabeli 4.1 przedstawione są parametry czujnika. Cena czujnika to 10zł.



Rysunek 4.4. Czujnik ultradźwiękowy HC-SR04

Tabela 4.1. Parametry czujnika ultradźwiękowego HC-SR04

Czujnik ultradźwiękowy HC-SR04	
napięcie zasilania	5V DC
średni pobór prądu	15 mA
zakres pomiarowy	2-400 cm
Wyjście	sygnał częstotliwościowy
częstotliwość pracy	40 kHz
Rozdzielczość pomiaru	0,3cm
Wymiary	45 x 20 x 15 mm

b) Belka tensometryczna BTENS-N1-035

Pomiar wagi belką tensometryczną BTENS-N1-035 (rys. 4.5) odbywa się w oparciu o zmianę rezystancji czujnika tensometrycznego wbudowanego w belkę. Dzięki dobrym parametrom urządzenia (tabela 4.2) pomiar wagi jest bardzo dokładny. Co ważne przy pomiarach poziomym belka jest wodoszczelna. Klasa wodoszczelności określona jest jako IP66/IP67. Oznacza to, że belka można pracować nawet po zanurzeniu na głębokość 1m. Cena belki tensometrycznej to 60zł.

Tabela 4.2 Parametry belki tensometrycznej BTENS-NA1-35

Belka tensometryczna BTENS-NA1-35	
napięcie zasilania	5-12V DC
zakres pomiarowy	0-35 kg
wyjście	2mV na każdy 1V zasilania
Rezystancja wejściowa	410Ω
Rezystancja wyjściowa	350Ω
Temperatura pracy	-20-60°C
Histereza	0,02%
Powtarzalność	0,02%
Nieliniowość	0,02%
Wymiary	130 x 30 x 22 mm



Rysunek 4.5. Belka tensometryczna BTENS-NA1-35

4.3. Mikrokontrolery

a) Raspberry Pi

Do zbudowania pierwszego układu wykorzystano platformę komputerową Raspberry Pi (rys. 4.6). Urządzenie posiada podstawowe porty takie jak USB, Jack 3,5mm oraz HDMI, ale także 8 portów GPIO, dzięki którym może zostać użyte do sterowania czujnikami pomiarowymi. Systemem operacyjnym jest Linux, co pozwala na zainstalowanie środowisk programistycznych działających na tym systemie operacyjnym. W połączeniu z bibliotekami obsługującymi porty GPIO daje to możliwość szybkiego przetestowania prostego systemu pomiarowego. Parametry znajdują się w tabeli 4.3)

Tabela 4.3. Parametry Raspberry Pi

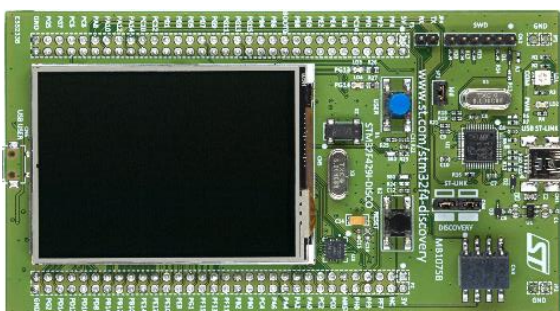
Raspberry Pi	
Architektura	ARM
CPU	700MHz
Pamięć (SDRAM)	256 MB
Nośnik danych	karta SD
Interfejsy	USB2.0, HDMI, RCA, 3,5mm jack, 8x GPIO, UART, I ² C, SPI
Napięcie zasilania	5V
Pobór prądu	500-700mA
Obsługiwane systemy	FreeBSD, Linux



Rysunek 4.6. Raspberry Pi

b) STM32F429i

Jako drugą platformę mikroprocesorową wybrano płytę ewaluacyjną STM32F429i (rys. 4.7). Urządzenie wyposażone jest w programator oraz wszystkie niezbędne układy potrzebne do zrealizowania systemu pomiarowego. Płytkę posiada wbudowany wyświetlacz LCD, który daje możliwość szybkiej prezentacji wyników pomiaru. Dzięki interfejsom możliwa jest komunikacja z komputerem lub zewnętrznymi układami. Podstawowe parametry zostały przedstawione w tabeli 4.4.



Rysunek 4.7. STM32F429i

Tabela 4.4. Parametry STM32F429i

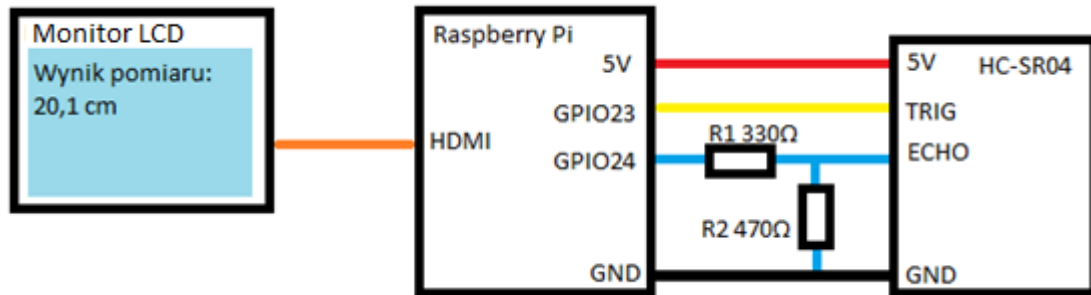
STM32F429i	
Architektura	ARM
Mikroprocesor	STM32F429ZIT6U: 2MB pamięci Flash, 256 kB RAM, maksymalna częstotliwość taktowania 180MHz
Pamięć (SDRAM)	64MB
Interfejsy	UART, CAN, I ² C, SPI
Wyświetlacz	2,4" QVGA TFT LCD
Napięcie zasilania	3V lub 5V
Programator	ST-LINK/V2

5. Skonstruowany system do pomiaru ilości wody

5.1. Płyta uruchomieniowa Raspberry PI

Aby przetestować działanie czujnika ultradźwiękowego zbudowano pierwszy układ pomiarowy w oparciu o płytę uruchomieniową Raspberry PI.

Na rysunku 5.1 przedstawiono schemat systemu pomiarowego.



Rysunek 5.1 Schemat systemu pomiarowego z wykorzystaniem Raspberry PI

Do sterowania czujnikiem ultradźwiękowym wykorzystano porty GPIO wbudowane w mikrokontroler. *GPIO23* odpowiada za rozpoczęcie pomiaru. *GPIO24* ma za zadanie odebrać sygnał z czujnika ultradźwiękowego. Jako, że sygnał wyjściowy (ECHO) z czujnika ma wartość 5V, a port *GPIO24* może odebrać sygnały o maksymalnym napięciu 3,3V zbudowano dzielnik napięciowy z rezystorów *R1* i *R2*.

Mikrokontroler podłączony jest do monitora przez port HDMI. Wyniki pomiaru wyświetlane są na ekranie monitora i zapisywane do pliku na karcie SD.

Raspberry Pi pracuje w oparciu o system operacyjny Linux. Oprogramowanie napisane jest w języku C. Do skompilowania kodu użyto kompilatora *GCC*. Do obsługi portów GPIO mikrokontrolera wykorzystano bibliotekę *WiringPi*.

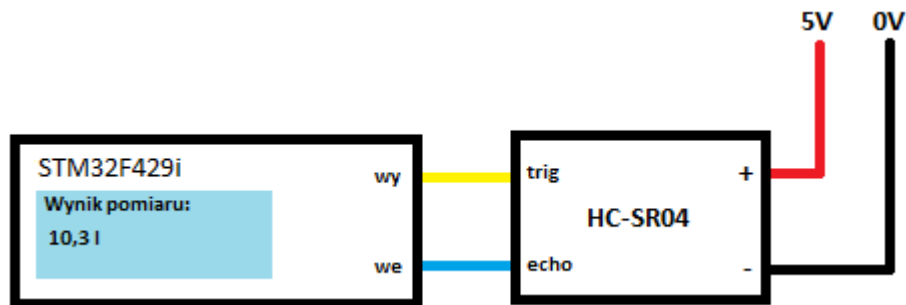
Z powodzeniem uruchomiono i przetestowano czujnik ultradźwiękowy HC-SR04 umieszczony nad powierzchnią wody na trzech wysokościach: 20, 50 i 100 cm. Wyniki przeprowadzonych testów znajdują się w rozdziale 8.2.a. Szczegółowe działanie czujnika ultradźwiękowego HC-SR04 znajduje się w rozdziale 5.2.1.

5.2. Płyta ewaluacyjna STM32F429i

Docelowy system pomiarowy działa w oparciu o płytę ewaluacyjną STM32F429i.

5.2.1. Metoda ultradźwiękowa

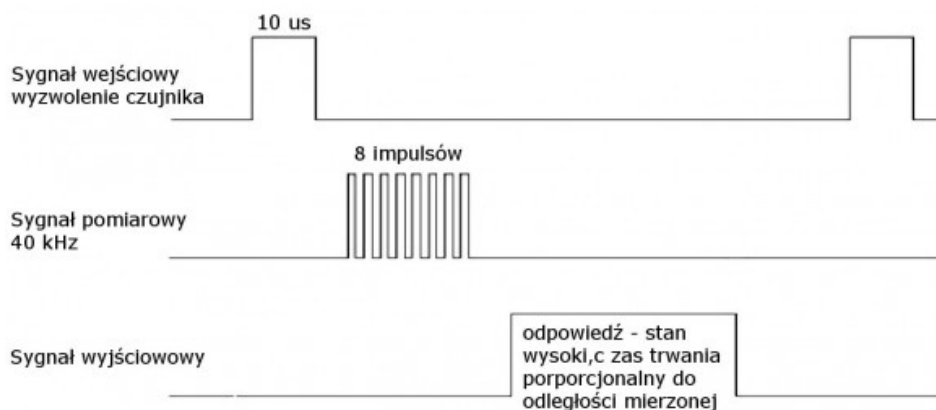
Uproszczony schemat systemu pomiarowego przedstawiono na rysunku 5.2. Czujnik ultradźwiękowy jest zasilany napięciem 5V. Do sterowania czujnikiem wykorzystano porty mikrokontrolera.



Rysunek 5.2 Schemat systemu pomiarowego dla metody ultradźwiękowej

Wejście *trig* czujnika podłączone jest bezpośrednio do pinu mikrokontrolera oznaczonego jako *wy* (w rzeczywistym układzie jest to pin oznaczony jako *PE2*). Za pomocą programu można kontrolować pin tak, żeby podawał impuls o wartości 5V na bardzo krótki okres czasu (10us). Wyjście *echo* czujnika podłączone jest do pinu mikrokontrolera oznaczonego jako *we* (w rzeczywistym układzie *PD2*).

Sygnal wyjściowy z czujnika ma wartość 5V, a czas jego trwania jest proporcjonalny do zmierzonej odległości. Czas trwania tego sygnału jest mierzony przez *Timer2* z dokładnością do 5us.



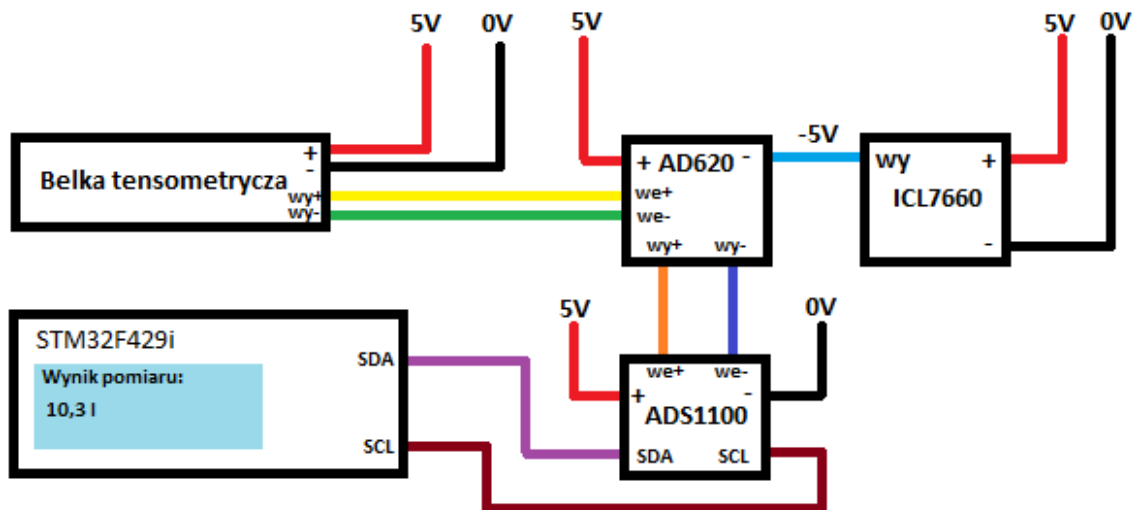
Rysunek 5.3. Zasada pomiaru czujnikiem ultradźwiękowym HC-SR04

Zasadę pomiaru przedstawia rysunek 5.3. Po podaniu impulsu o czasie trwania 10 μ s na wejście *Trig* czujnika zaczyna się pomiar odległości. Wysyłane jest 8 impulsów o częstotliwości 40kHz. Po odebraniu impulsów odbitych od przeszkody na wyjściu czujnika jest sygnał o czasie trwania proporcjonalnym do zmierzonej odległości.

Sterowanie czujnikiem, jak i odbieranie sygnału z jego wyjścia dokonywane jest przy pomocy mikrokontrolera STM32F429i.

5.2.2. Metoda wagowa

Uproszczony schemat systemu pomiarowego dla metody wagowej przedstawiono na rysunku 5.4. Na wyjściu belki tensometrycznej sygnał ma wartość kilku miliwoltów, dlatego zbudowano układ, który wzmacnia sygnał. Wzmocniony sygnał z belki jest przetwarzany przez zewnętrzny przetwornik analogowo-cyfrowy. Za sterowanie układem i przetworzenie wyników pomiaru odpowiada płytka ewaluacyjna STM32F429i.



Rysunek 5.4. Schemat systemu pomiarowego dla metody wagowej

Przy napięciu zasilania 5V na wyjściu belki różnica napięć dla zaprojektowanego zbiornika o pojemności 28l wynosi od 0 do 9mV. Napięcie to zmienia się w zależności od objętości wody w zbiorniku: im więcej wody w zbiorniku tym różnica napięć na wyjściu belki jest większa.

W celu wzmocnienia napięcia z wyjścia belki tensometrycznej wykorzystany został wzmacniacz AD620. Wzmacniacz zasilany jest z napięcia symetrycznego -5V i 5V. Jest to wzmacniacz pomiarowy o regulowanym wzmocnieniu od 1 do 10000. Wzmacniacz posiada symetryczne wejście. Na wyjściu wzmacniacza różnica napięć wyraża się wzorem 5.1.

$$U_{wy} = U_{we} \cdot G + V_{REF} \quad (5.1)$$

Gdzie: U_{wy} – napięcie na wyjściu wzmacniacza, U_{we} – różnica napięć na wejściu wzmacniacza, G – wzmocnienie, V_{REF} – napięcie odniesienia

Napięcie odniesienia w przypadku zaprojektowanego układu pomiarowego podłączone jest do masy. Dlatego napięcie wyjściowe wyrażone jest w tym przypadku jako iloczyn wzmocnienia i napięcia wejściowego (wzór 5.2).

$$U_{wy} = U_{we} \cdot G \quad (5.2)$$

Regulacja wzmocnienia odbywa się przez wstawienie między odpowiednie piny rezystora o obliczonej ze wzoru 4.3 wartości.

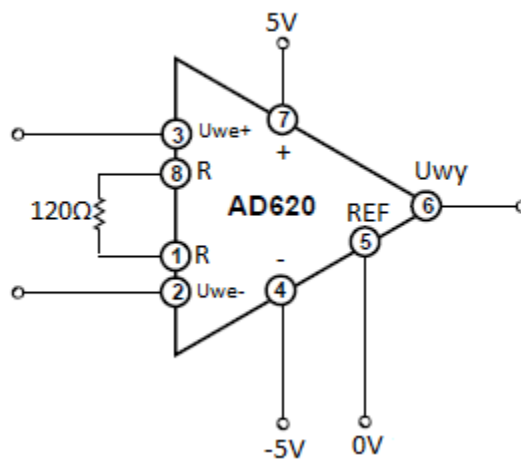
$$R = \frac{49,4k\Omega}{G-1} \quad (5.3)$$

Gdzie: R – obliczona wartość rezystora, G – wymagane wzmocnienie

Z napięciem zasilania wiąże się ograniczenie wartości napięcia wyjściowego. Według noty katalogowej dla wartości zasilania -5V i 5V napięcie wejściowe może mieścić się w przedziale od -3,1V do 3,8V.

Uwzględniając powyższe warunki do regulacji wzmocnienia został wykorzystany rezystor o wartości 120Ω o tolerancji 1%, a otrzymane wzmocnienie to 414.

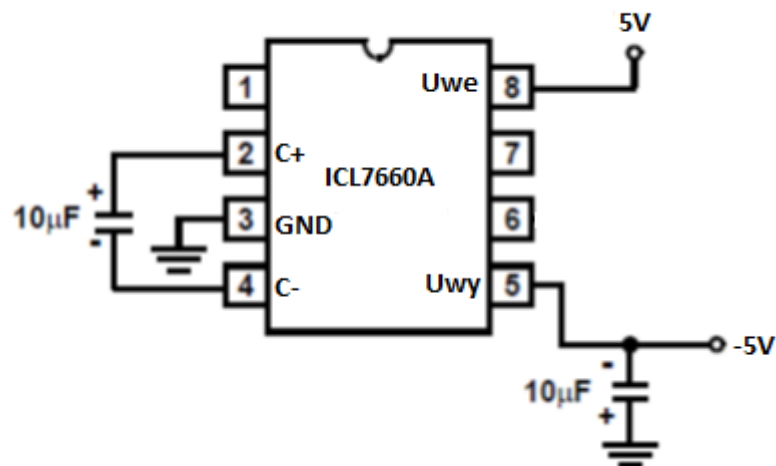
Konfiguracja wzmacniacza AD620 znajduje się na rysunku 5.5.



Rysunek 5.5. Konfiguracja wzmacniacza AD620.

Napięcie $-5V$ otrzymywane jest przy pomocy konwertera napięcia ICL7660ACPAZ.

Jest to układ, który zamienia napięcie wejściowe o wartości od $1,5V$ do $12V$ na napięcie przeciwne (czyli od $-12V$ do $-1,5V$ odpowiednio dla napięcia wejściowego). Do działania potrzebne są jedynie dwa kondensatory o pojemności $10\mu F$. Konfiguracja konwertera ICL7660A przedstawiona jest na rysunku 5.6.



Rysunek 5.6. Konfiguracja konwertera ICL7660A.

Jako przetwornik analogowo-cyfrowy wykorzystywany jest ADS1100 o rozdzielczości 16 bitów. Zasilany jest napięciem 0V i 5V.

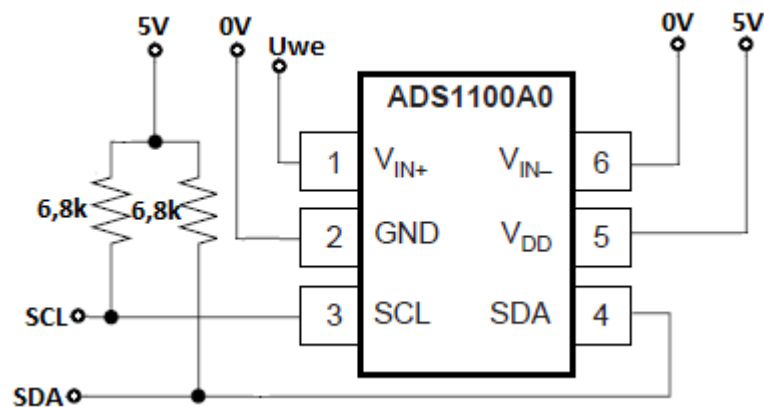
ADS1100 jest układem, który posiada symetryczne wejście tzn. sygnał na wyjściu przetwornika zależy od różnicy napięć na wejściu. W przypadku zbudowanego układu napięcie wejściowe o mniejszym potencjale (V_{IN-}) dołączone jest do masy. Oznacza to, że wynik z przetwornika zależy jedynie od napięcia wejściowego o większym potencjale (V_{IN+}). Na rysunku 5.7 przedstawiona jest konfiguracja przetwornika ADS1100.

Według noty katalogowej przetwornika ADS1100 przy napięciu zasilania 0 i 5V napięcie V_{IN+} może mieć wartość w zakresie od -0,2V do 5,2V. Jest to wartość odpowiednia do przetworzenia napięcia z wyjścia wcześniej opisanego wzmacniacza AD620.

Wynik ze wzmacniacza zostanie przetworzony z 15 bitową rozdzielczością. Ze względu na ograniczenia na wyjściu wzmacniacza AD620 wynik z przetwornika będzie w przedziale od 0 do około 25000 próbek. Pełny zakres (32767 próbek) mógłby zostać wykorzystany przy większej wartości napięcia zasilania wzmacniacza AD620. Ustalono, że wartość 25000 próbek jest wystarczająca do dokładnego odczytania napięcia z belki tensometrycznej.

Do komunikacji między przetwornikiem analogowo-cyfrowym, a mikrokontrolerem wykorzystany jest interfejs I²C. I²C do przesyłania danych wykorzystuje dwie linie: dwukierunkowa SDA (Serial Data Line) oraz jednokierunkowa SCL (Serial Clock Line). Obie linie dołączone są do zasilania 5V przez rezystory o wartości 6,8k Ω (pull-up).

Mikrokontroler odbiera 2 bajty danych wyjściowych z przetwornika, które zawierają wynik pomiaru. Możliwa jest również zmiana konfiguracji przetwornika: wybór wzmocnienia oraz trybu pomiaru. Dla tego systemu pomiarowego wzmocnienie wynosi $G=1$. Przetwornik działa w trybie ciągłym – po zakończeniu jednego pomiaru od razu wykonywany jest kolejny pomiar. Wynik po każdym pomiarze zapisywany jest do 2 bajtów danych, skąd może być odczytany przez mikrokontroler STM32F429i.



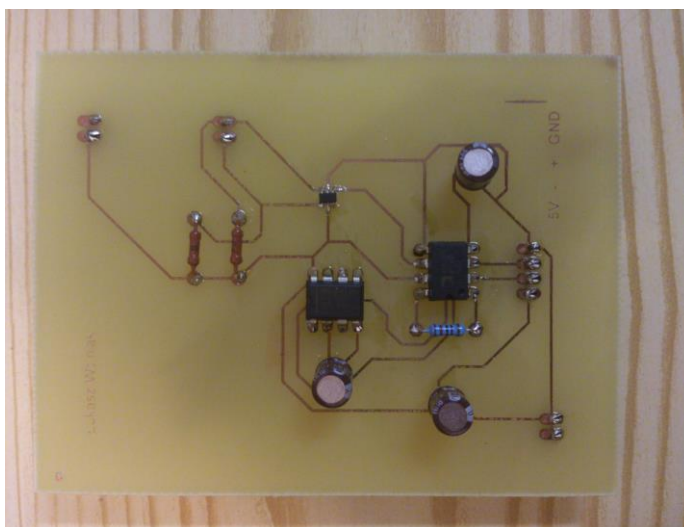
Rysunek 5.7. Konfiguracja przetwornika analogowo-cyfrowego.

5.2.3. Wykonanie płytki drukowanej

Opisany w rozdziale 5.2.2 układ został zaprojektowany w bezpłatnej wersji programu Eagle do tworzenia obwodów drukowanych.

Program pozwala na tworzenie schematów elektrycznych układów. Dzięki bogatej bibliotece oraz możliwości edycji konkretnych elementów układu utworzono schemat odpowiadający postawionym wymaganiom. Po utworzeniu schematu elektrycznego zaprojektowano połączenia między elementami na jednostronnej płytce drukowanej. Płytką została zaprojektowana tak, aby stanowiła moduł dołączany do mikrokontrolera STM32F429i.

Płytką została wytrawiona, a wszystkie elementy układu przylutowane. Zdjęcie płytki widoczne jest na rysunku 5.8.



Rysunek 5.8. Wykonany układ na płytce drukowanej

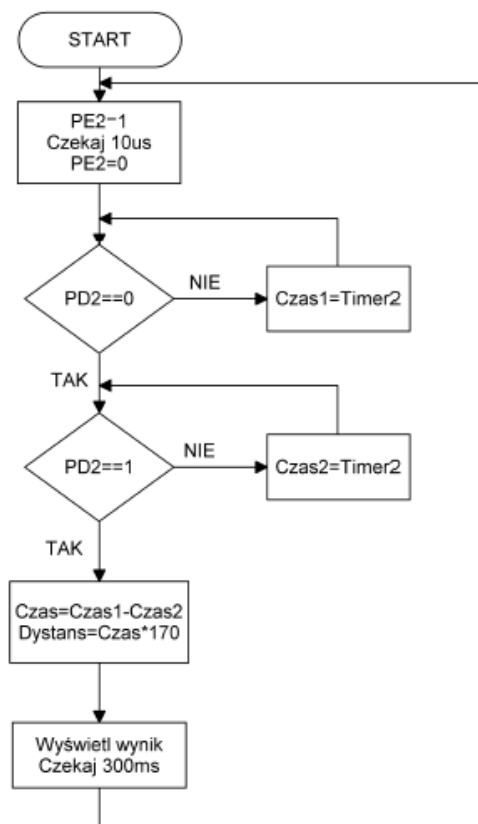
5.3. Oprogramowanie mikrokontrolera STM32F429i

Oprogramowanie mikrokontrolera napisane zostało w języku C. Wykorzystano bezpłatne środowisko Eclipse. Do jego działania niezbędne jest zainstalowanie pakietu Java Development Kit. Eclipse daje możliwość programowania w wielu językach takich jak C, C++, Java, Pascal. Dużą zaletą jest możliwość instalacji wtyczek, dzięki którym można dostosować środowisko do własnych potrzeb i sprzętu.

Do rozpoczęcia programowania mikrokontrolera STM32F429i niezbędna jest wcześniejsza konfiguracja Eclipse polegająca na instalacji sterowników, odpowiednich wtyczek oraz *Arm-none-eabi-gcc* i *OpenOCD*.

5.3.1. Metoda ultradźwiękowa

Program rozpoczyna pracę od skonfigurowania *Timera2* niezbędnego do zmierzenia czasu trwania sygnału z czujnika ultradźwiękowego oraz wyświetlacza LCD, na którym zostaną przedstawione wyniki pomiaru. *Timer2* dokonuje pomiaru czasu z dokładnością 5us. Skonfigurowane zostają także piny: *PE2* jako wyjściowy oraz *PD2* jako wejściowy. Schemat blokowy programu widoczny jest na rysunku 5.9.



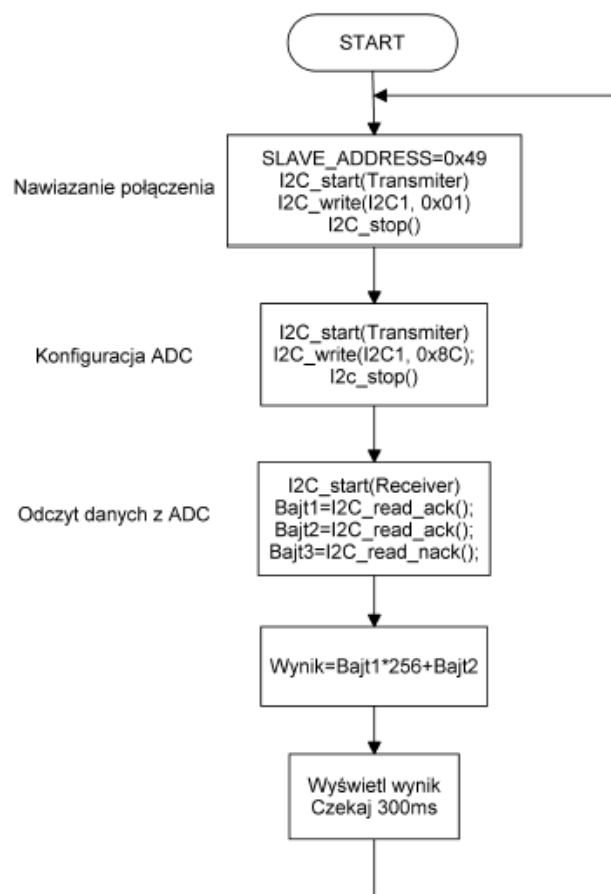
Rysunek 5.9. Schemat blokowy programu mikrokontrolera STM32F429i dla metody ultradźwiękowej

Po konfiguracji program za pomocą pinu *PE2* wysyła impuls o czasie trwania 10us do czujnika ultradźwiękowego, co rozpoczyna pomiar. Następnie program w pierwszej pętli sprawdza, czy czujnik rozpoczął wysyłanie sygnału informującego o czasie trwania pomiaru ($PD2==0$). Druga pętla sprawdza, czy wysyłanie się zakończyło ($PD2==1$). Po zakończeniu odbierania sygnału z czujnika program przelicza otrzymany czas na dystans (zgodnie ze wzorem 3.5) i wyświetla wyniki.

5.3.2. Metoda wagowa

Program rozpoczyna pracę od skonfigurowania interfejsu I²C służącego do obierania danych z przetwornika analogowo-cyfrowego oraz wyświetlacza LCD, na którym zostaną przedstawione wyniki pomiaru. Do komunikacji z ADC zostają skonfigurowane piny: *PB8* jako SCL oraz *PB9* jako SDA. Adres przetwornika ADS1100 to 1001001. Urządzeniem inicjującym połączenie jest mikrokontroler (*master*). ADC pracuje w trybie *slave*.

Schemat blokowy programu znajduje się na rysunku 5.10.



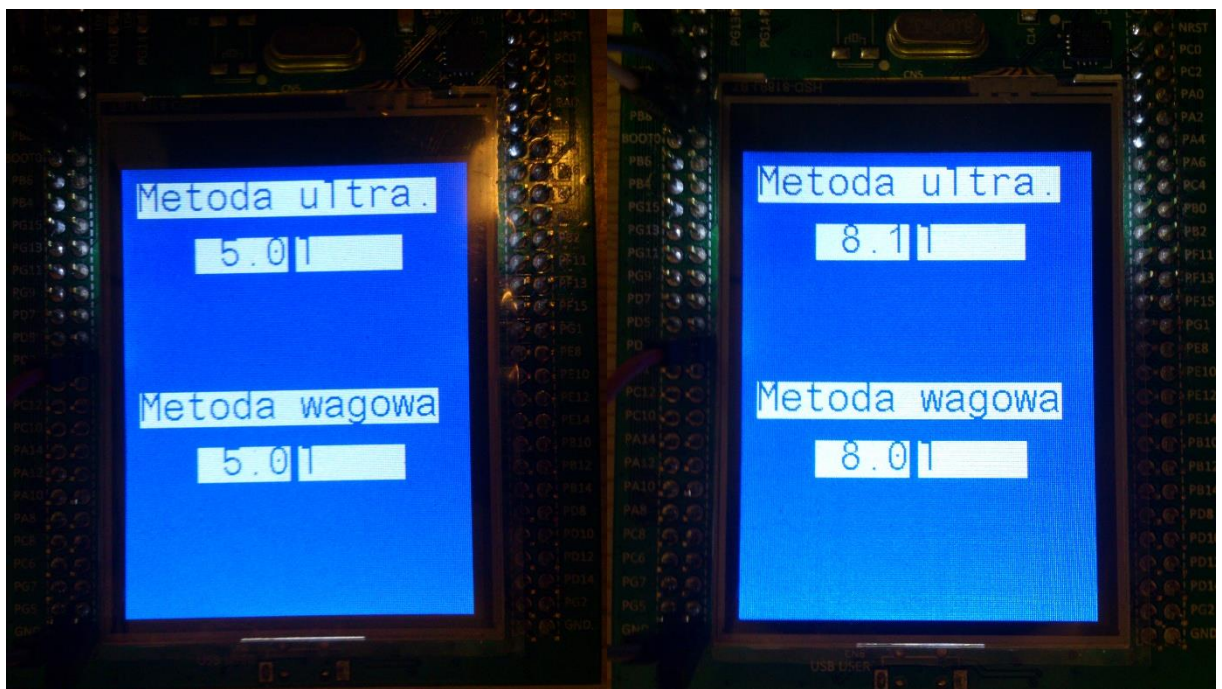
Rysunek 5.10. Schemat blokowy programu mikrokontrolera STM32F429i dla metody wagowej.

Połączenie rozpoczyna przez wysłanie na magistralę bajta z adresem urządzenia *slave* i kierunkiem transmisji na najmłodszym bicie.

Nawiązanie połączenia odbywa się przez wysłanie 1 bajta do urządzenia. Konfiguracja ADC polega na wysłaniu bajta konfiguracyjnego do urządzenia.

Wyniki pomiaru zapisane są w *Bajcie1* i *Bajcie2*. Ze względu na fakt, że *Bajt1* jest starszym bajtem wyniku jego wartość jest mnożona przez 2^8 .

Przykładowe wyniki pomiarów są widoczne na wyświetlaczu LCD mikrokontrolera (rys 5.11).



Rysunek 5.11. Zdjęcia wyświetlacza mikrokontrolera podczas działania programu

5.4. Oprogramowanie do obserwacji wyników pomiaru

Program umożliwia odbiór, obserwację i zapis wyników pomiaru na komputerze PC. Program został napisany w języku C# w środowisku programistycznym Visual Studio 2013. Rysunek 5.12 przedstawia przykładowy zrzut ekranu z działania programu.

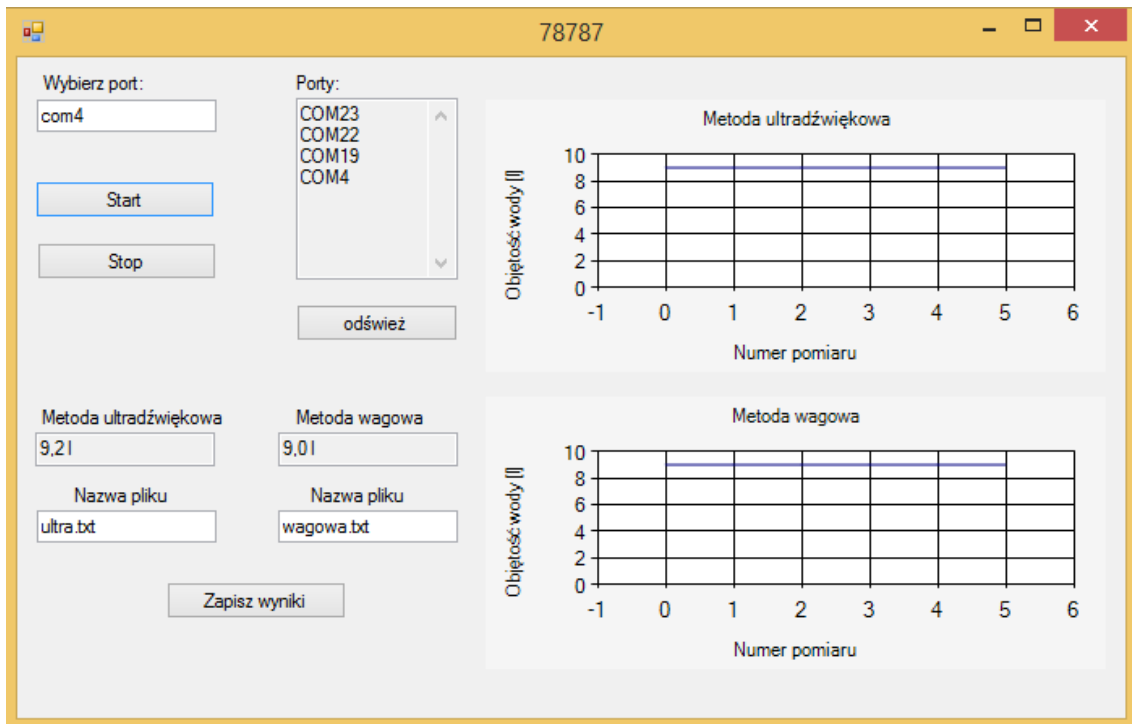
Po rozpoczęciu działania programu wyświetlają się dostępne porty. Należy wybrać odpowiedni port, do którego podłączony jest mikrokontroler. W każdej chwili istnieje możliwość odświeżenia listy dostępnych portów.

Po kliknięciu przycisku *start* program nawiązuje połączenie z mikrokontrolerem. Można przerwać połączenie wciskając przycisk *stop*.

Istnieje możliwość zapisu wyników pomiaru do pliku tekstowego o podanej nazwie. Nazwę pliku należy podać w polach *Nazwa pliku* przy nazwie odpowiedniej metody pomiarowej. Pliki zapisywane są pod adresem C:\ po kliknięciu przycisku *Zapisz wyniki*.

Ostatni odebrany wynik pomiaru z danej metody pomiarowej jest wyświetlany w polu znajdującym się pod nazwą metody.

Możliwa jest obserwacja wyników pomiaru w czasie rzeczywistym na wykresach. Za każdym razem gdy program odbierze wyniki pomiaru z mikrokontrolera do wykresu dodawany jest kolejny punkt pomiarowy, a wykresy są uaktualniane.



Rysunek 5.12. Program komputerowy do obserwacji wyników pomiaru

6. Analiza błędów i dokładności pomiarowych

a) metoda ultradźwiękowa

Na dokładność pomiaru metodą ultradźwiękową mogą mieć wpływ następujące czynniki: dokładność czujnika ultradźwiękowego oraz dokładność pomiaru czasu za pomocą mikrokontrolera.

Z noty katalogowej czujnika HC-SR04 wynika, że pomiar dokonywany jest z dokładnością 3mm.

Pomiar czasu za pomocą *Timera2* wbudowanego w mikrokontroler STM32F429i jest dokonywany w dokładnością 5us. Odpowiada to dystansowi 0,85mm co wynika ze wzoru 6.1.

$$d = v \cdot \frac{t}{2} \quad (6.1)$$

Gdzie: d – przebyta droga, v - prędkość dźwięku w powietrzu (340m/s), t – czas (5us)

Maksymalny błąd pomiaru otrzymany po zsumowaniu błędów składowych ma wartość 3,85mm. Przy założeniu, że podstawa zbiornika ma 1000cm² jednemu litrowi wody odpowiada dystans 10mm. W zbiorniku o pojemności 30 litrów błąd metody ultradźwiękowej wynosi 1,3%. Jest to wartość mniejsza niż wynikająca z wymagań projektowych (5%).

b) metoda wagowa

Na dokładność pomiaru metodą wagową mogą wpłynąć: rozdzielczość przetwornika analogowo-cyfrowego, dokładność pomiaru czujnika tensometrycznego, dokładność rezystora użytego do regulowania wzmocnienia wzmacniacza AD620.

Do przetworzenia napięcia przetwornik ADC korzysta z 15 bitów. Jak zostało wspomniane w rozdziale 4.2.2, wynik z przetwornika może mieścić się w zakresie od 0 do 25000 próbek. Przy 30 litrach wody w zbiorniku daje to rozdzielczość 1,2ml.

Użyta belka tensometryczna jest klasy C3, co oznacza, że posiada 3000 działek. Zakres pomiarowy belki to 35kg. Oznacza to, że rozdzielczość belki tensometrycznej to 11,6g. Przy założeniu, że 1 litr wody waży 1kg, daje to rozdzielczość 11,6ml.

Dokładność rezystora użytego do regulowania wzmocnienia układu AD620 ma wpływ na napięcie wyjściowe ze wzmacniacza, a więc również na wynik z przetwornika ADC. Tolerancja użytego rezystora wynosi 1%. Rezystor ma jednak wpływ jedynie przy pomiarach napięcia. Po kalibracji systemu pomiarowego napięcie jest przeliczane na litry, a wartość wzmocnienia wzmacniacza nie ma wpływu na wyniki po kalibracji.

Po kalibracji maksymalny błąd po zsumowaniu błędów składowych ma wartość 12,8ml. W zbiorniku o pojemności 30 litrów błąd wynosi 0,043%. Jest to wartość znacznie mniejsza niż wynikająca z wymagań projektowych (5%).

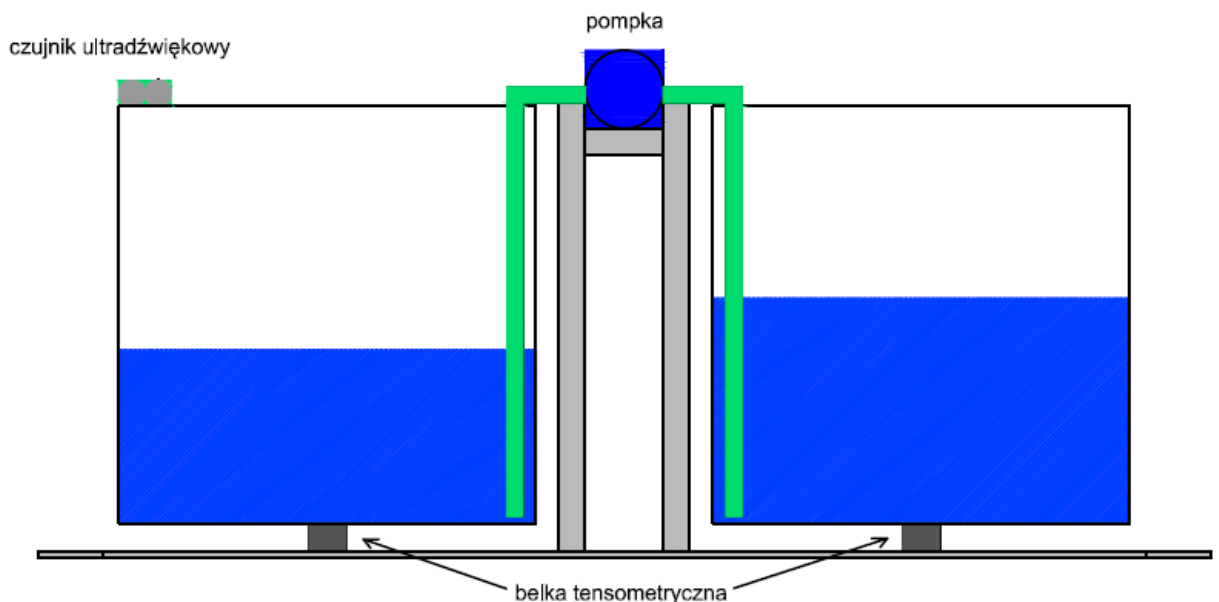
7. Stanowisko pomiarowe

7.1 Projekt stanowiska pomiarowego

Do przetestowania wybranych metod pomiarowych zostało przygotowane stanowisko pomiarowe. W tym celu zaprojektowano stanowisko o następujących parametrach:

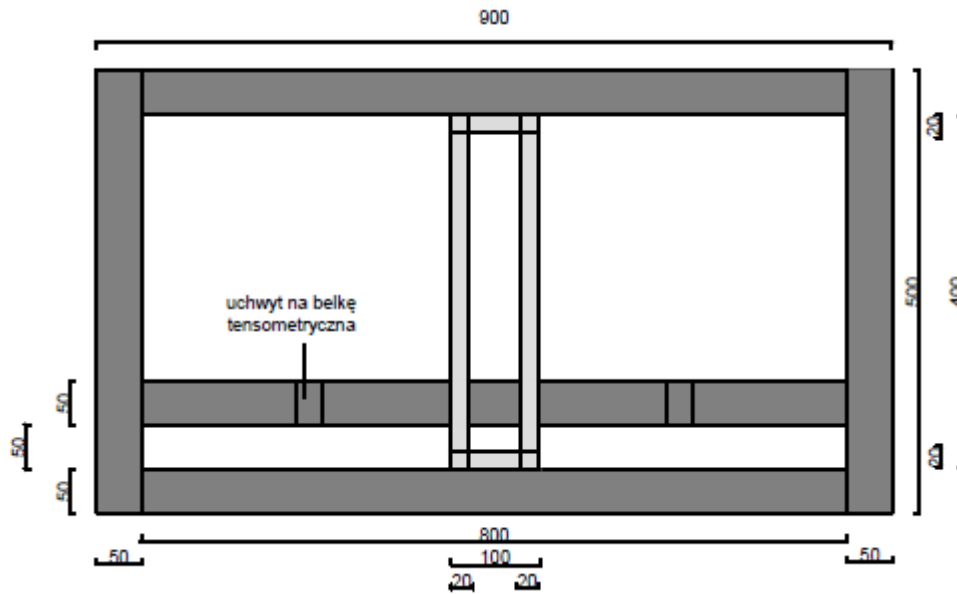
- zbiorniki o pojemności około 30l
- możliwość zamontowania czujnika ultradźwiękowego na pokrywie zbiornika
- możliwość zamontowania zbiorników na belkach tensometrycznych
- woda przepompowywana za pomocą pompki o regulowanej za pomocą napięcia wydajności
- możliwość symulacji przyspieszania i hamowania maszyny sprzątającej (poruszania konstrukcją zbiornika)
- dodatkowo stanowisko pomiarowe wyposażone jest w inne systemy pomiarowe, które nie są częścią tej pracy

Zaprojektowane stanowisko przedstawia rysunek 7.1.

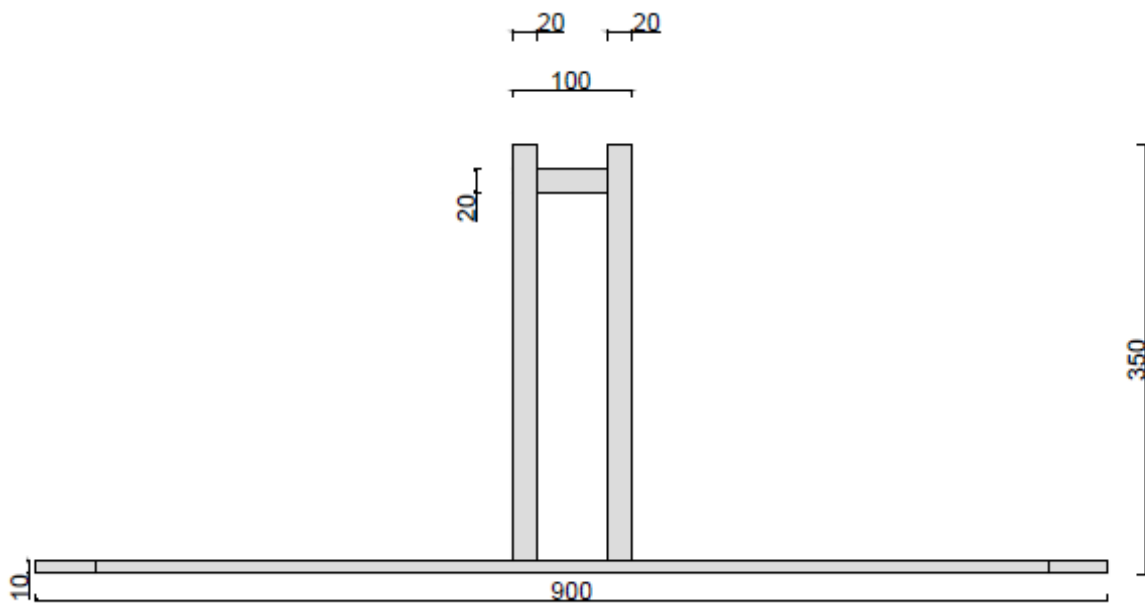


Rysunek 7.1. Projekt stanowiska pomiarowego

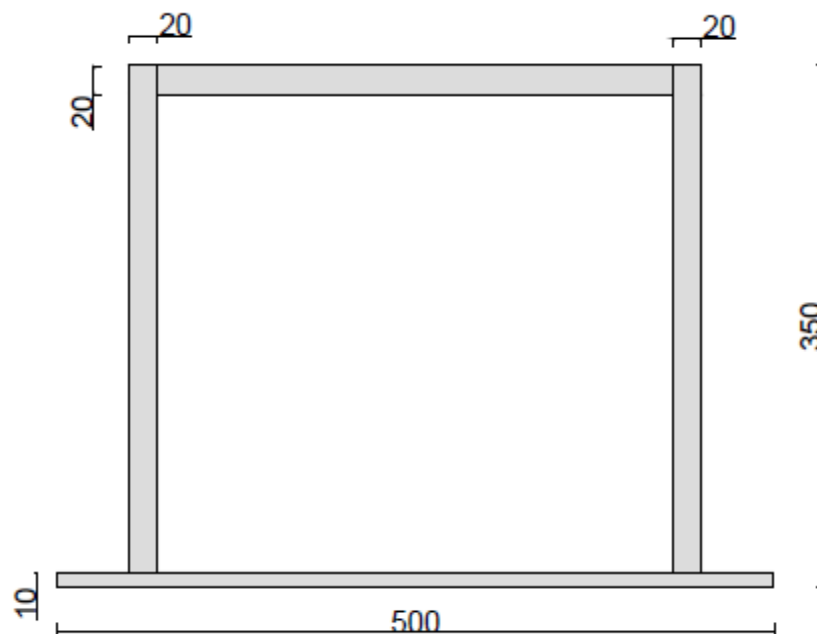
Rysunki 7.2, 7.3 i 7.4 przedstawiają projekt stanowiska w trzech rzutach: od góry, z przodu i z boku. Wszystkie wymiary podane są w milimetrach.



Rysunek 7.2. Widok stanowiska pomiarowego od góry

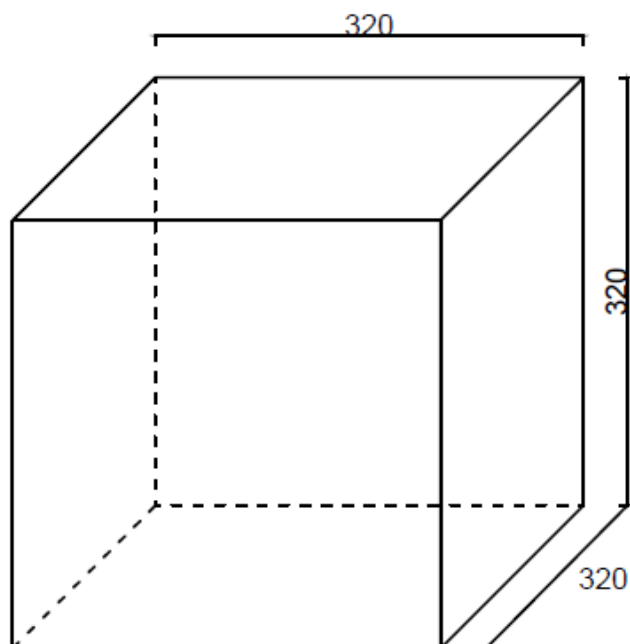


Rysunek 7.3. Widok stanowiska pomiarowego z przodu



Rysunek 7.4. Widok stanowiska pomiarowego z boku

Rysunek 7.5 przedstawia projekt zbiornika na wodę. Wymiary podane są w milimetrach. Ściany zbiornika wykonane są z pleksi o grubości 5mm.



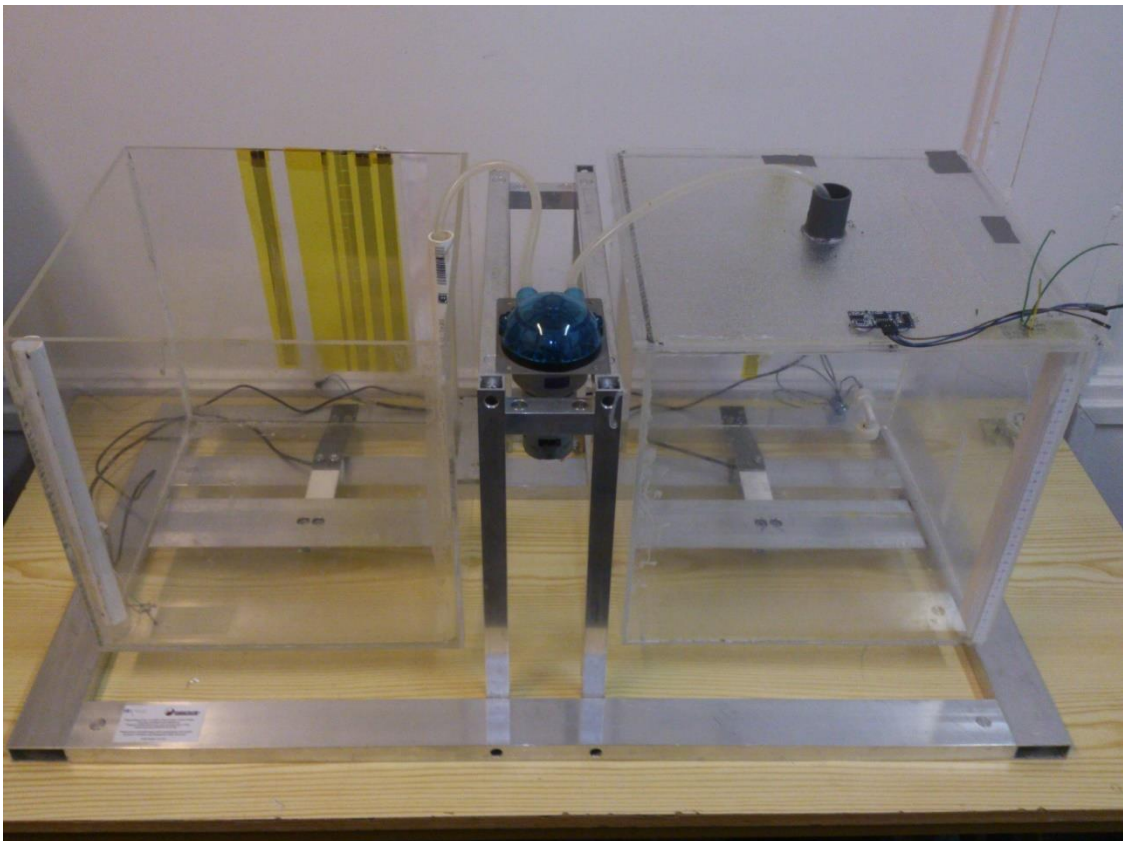
Rysunek 7.5. Zbiornik na wodę.

7.2. Opis zbudowanego stanowiska pomiarowego

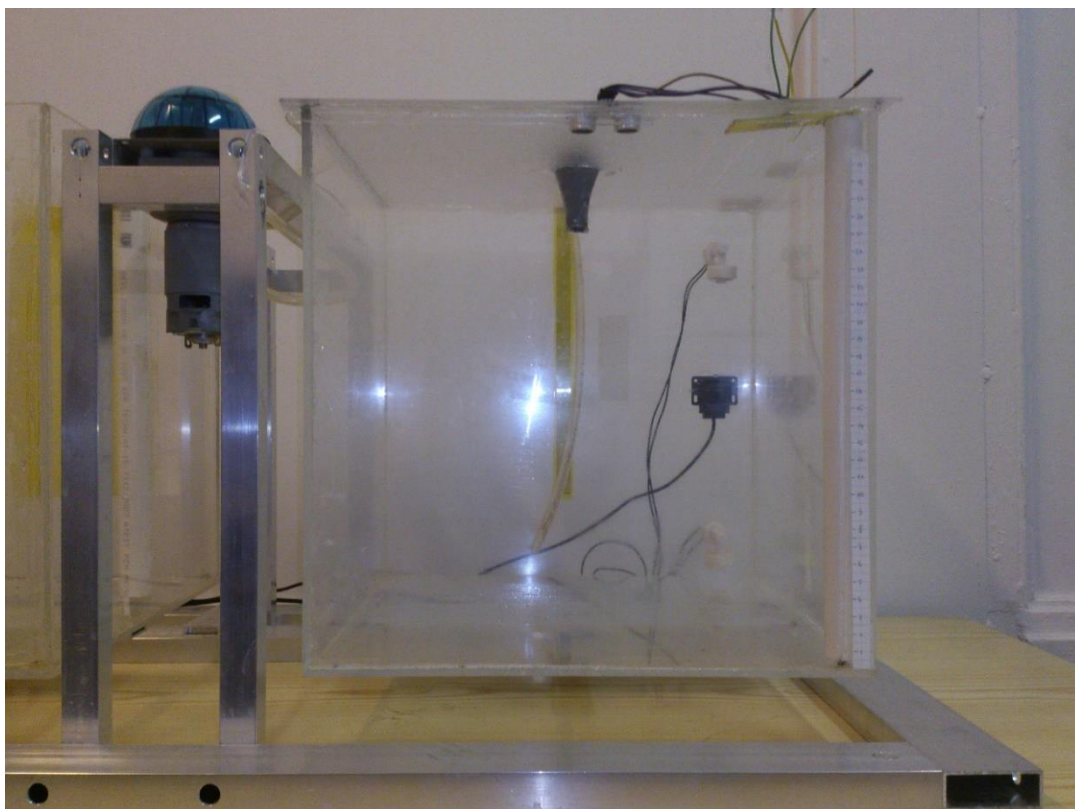
Stanowisko pomiarowe składa się z dwóch zbiorników w kształcie sześcianów o boku 320mm wykonanych z bezbarwnej pleksi. Zbiorniki są sklejone klejem przeznaczonym do klejenia pleksi. Pojemność to około 30dm³ (30 litrów). Zbiorniki umieszczone są na belkach tensometrycznych, które przymocowane są do wspólnej ramy. Rama wykonana jest z aluminiowych profili.

Wodę z jednego zbiornika do drugiego można przepompowywać za pomocą pompki perystaltycznej 200 EVO o regulowanej za pomocą napięcia (do 12V) wydajności 80-335ml/min.

Zbudowane stanowisko przedstawiają rysunki 7.6 i 7.7.



Rysunek 7.6. Zbudowane stanowisko pomiarowe – w przezroczystej dolnej ścianie zbiornika widoczne belki tensometryczne



Rysunek 7.7. Zbudowane stanowisko pomiarowe – zbiornik pomiarowy z zamontowanym w górnej części czujnikiem ultradźwiękowym

8. Testy systemu pomiarowego

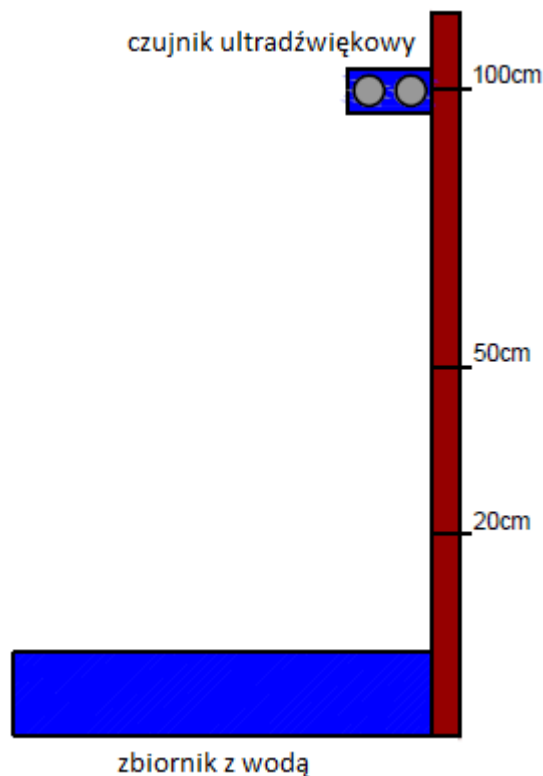
8.1. Przeprowadzone eksperymenty

a) **Eksperyment 1:** Testowanie czujnika ultradźwiękowego z użyciem platformy Raspberry Pi

Ekspertyment polega na sprawdzeniu poprawności działania czujnika ultradźwiękowego HC-SR04. Celem eksperymentu jest ustalenie czy czujnik HC-SR04 można wykorzystać do pomiarów ilości wody w zbiorniku.

Czujnik ultradźwiękowy podłączony do mikrokontrolera Raspberry Pi (zgodnie z rysunkiem 5.1) umieszczony jest nad powierzchnią wody na trzech wysokościach: 20, 50 oraz 100cm. Odległość czujnika od powierzchni wody zmierzono taśmą mierniczą o rozdzielczości 1mm.

Do pomiaru wykorzystano stanowisko pomiarowe zbudowane na potrzeby eksperymentu (rys. 8.1)



Rysunek 8.1. Stanowisko pomiarowe do testowania metody ultradźwiękowej

Eksperymenty 2, 3, 4, 5, 6 wykonane są na zbudowanym stanowisku pomiarowym przedstawionym w rozdziale 7. W dalszych pomiarach zastosowano systemy pomiarowe bazujące na platformie STM32F429i.

b) Eksperyment 2: Pomiar ilości wody w zbiorniku metodą ultradźwiękową.

Eksperyment polega na pomiarze odległości między czujnikiem ultradźwiękowym umieszczonym na pokrywie zbiornika, a powierzchnią wody w zbiorniku.

Do pustego zbiornika wlewane jest po odmierzonej 1 litrze wody, a następnie wykonywanych jest 100 pomiarów odległości w czasie 30s (1 pomiar co 300ms). Wykonanych jest 29 serii pomiarowych: od 0 litrów do 28 litrów wody w zbiorniku. Litr wody odmierzone naczyniem z podziałką z szacowaną dokładnością 1% (w następnych eksperymentach korzystano z tego samego naczynia).

c) Eksperyment 3: Pomiar metodą ultradźwiękową przy symulowaniu przyspieszania i hamowania maszyny sprzątającej.

Celem eksperymentu jest zbadanie wpływu poruszania się zbiornika podczas hamowania i przyspieszania maszyny na wyniki pomiaru odległości metodą ultradźwiękową.

Pomiar wykonywany jest dla trzech objętości wody w zbiorniku: 5, 10, 15 litrów. Dla każdej objętości wykonywanych jest 100 pomiarów w czasie 30s (1 pomiar co 300ms). Podczas pomiaru konstrukcja stanowiska pomiarowego jest poruszana.

d) Eksperyment 4: Testowanie wpływu obecności piany na wyniki pomiaru metodą ultradźwiękową.

Celem eksperymentu jest sprawdzenie czy metoda ultradźwiękowa może być wykorzystana do pomiaru ilości wody, gdy na powierzchni znajduje się piana.

Pomiar wykonywany jest dla trzech objętości wody w zbiorniku: 5, 10, 15 litrów. Dla każdej objętości wykonywane są trzy serie pomiarowe, każda dla innej grubości piany: 10, 20, 30mm. Każda seria pomiarowa to 100 pomiarów wykonanych w ciągu 30s (1 pomiar co 300ms).

e) **Eksperyment 5:** Pomiar ilości wody w zbiorniku metodą wagową.

Eksperyment polega na pomiarze wzmocnionego napięcia z wyjścia belki tensometrycznej podczas zwiększania objętości wody w zbiorniku.

Do pustego zbiornika wlewane jest po odmierzonej 1 litrze wody, a następnie wykonywanych jest 100 pomiarów napięcia w czasie 30s (1 pomiar co 300ms). Wykonanych jest 29 serii pomiarowych: od 0 litrów do 28 litrów wody w zbiorniku.

f) **Eksperyment 6:** Pomiar metodą wagową przy symulowaniu przyspieszania i hamowania maszyny sprzątającej.

Celem eksperymentu jest zbadanie wpływu poruszania się zbiornika podczas hamowania i przyspieszania maszyny na wyniki pomiaru metodą wagową.

Pomiar wykonywany jest dla trzech objętości wody w zbiorniku: 5, 10, 15 litrów. Dla każdej objętości wykonywanych jest 100 pomiarów w czasie 30s (1 pomiar co 300ms). Podczas pomiaru konstrukcja stanowiska pomiarowego jest poruszana.

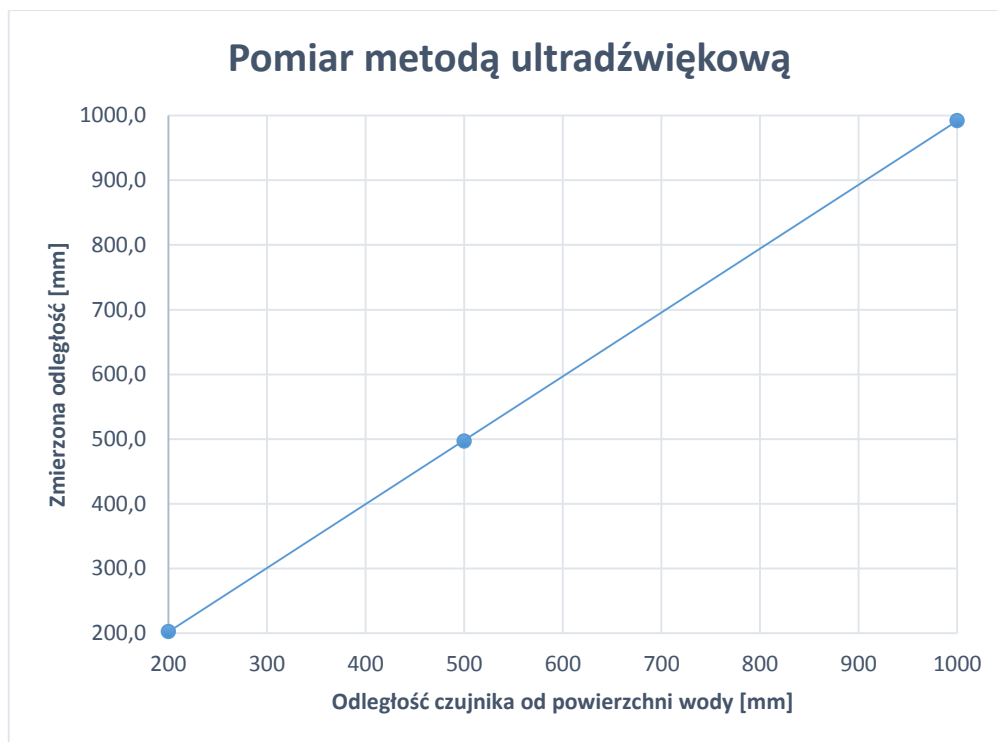
8.2. Wyniki pomiarów

a) **Eksperyment 1:** Testowanie czujnika ultradźwiękowego z użyciem platformy Raspberry Pi

W tabeli 8.1 przedstawiono wyniki pomiaru odległości czujnika od powierzchni wody metodą ultradźwiękowa z wykorzystaniem Raspberry Pi. Wyniki pomiaru zaprezentowane są na wykresie znajdującym się na rysunku 8.2.

Tabela 8.1 Wyniki pomiaru odległości metodą ultradźwiękową z wykorzystaniem Raspberry Pi

Pomiar metodą ultradźwiękową		
odległość od wody [mm]	średnia [mm]	odchylenie standardowe [mm]
200	202,8	4,8
500	497,1	6,7
1000	992,4	13,0



Rysunek 8.2. Wyniki pomiaru odległości metodą ultradźwiękową przy wykorzystaniu Raspberry Pi

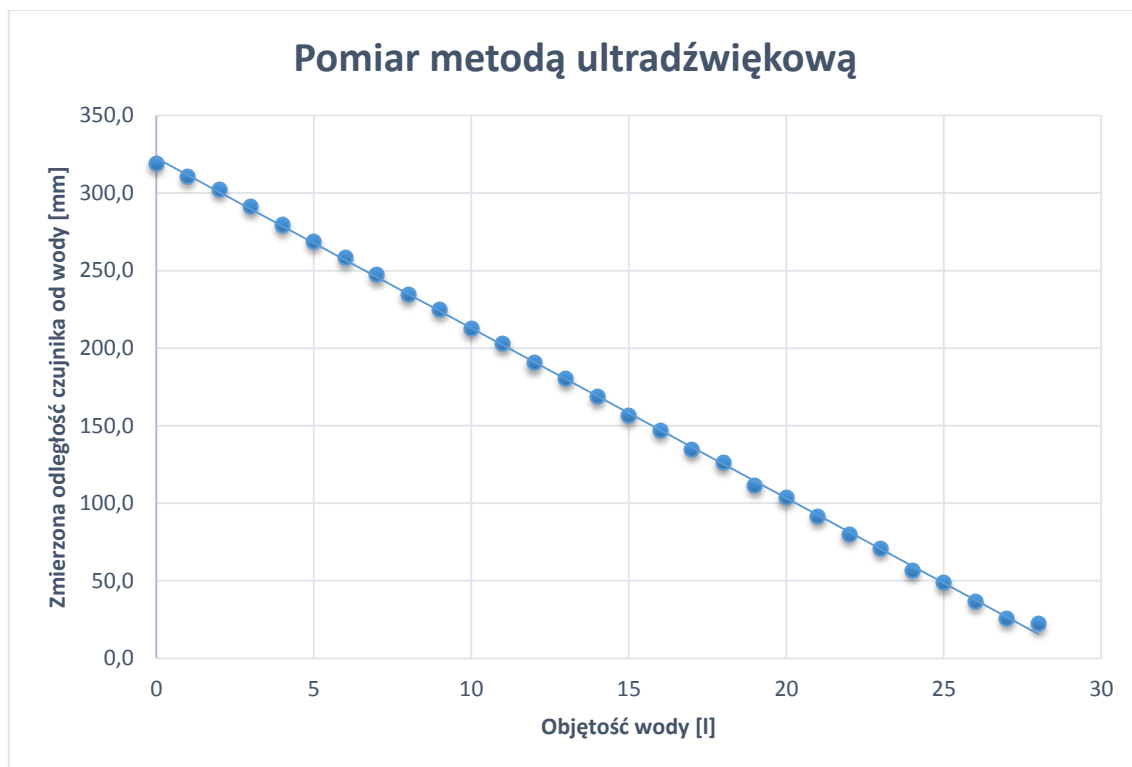
Wnioski z przeprowadzonego eksperymentu: czujnik ultradźwiękowy z powodzeniem może zostać użyty do pomiaru ilości wody w zbiorniku.

b) Eksperyment 2: Pomiar ilości wody w zbiorniku metodą ultradźwiękową.

W tabeli 8.2 przedstawiono wyniki pomiaru odległości czujnika od powierzchni wody metodą ultradźwiękową. Wyniki pomiaru zaprezentowane są na wykresie znajdującym się na rysunku 8.3.

Tabela 8.2 Wyniki pomiaru odległości metodą ultradźwiękową

Pomiar odległości metodą ultradźwiękową		
	odległość wody od czujnika [mm]	
objętość [l]	średnia	odchylenie standardowe
0	319,2	0,5
1	310,7	2,2
2	302,6	5,0
3	291,2	0,4
4	279,4	1,4
5	268,8	1,0
6	258,2	0,5
7	247,1	1,1
8	234,9	2,1
9	224,8	1,0
10	212,8	2,3
11	202,8	0,5
12	190,5	2,8
13	180,4	1,2
14	168,8	2,3
15	156,9	2,2
16	147,2	2,2
17	134,6	2,4
18	126,0	0,8
19	111,7	2,3
20	103,5	1,5
21	91,6	2,5
22	79,9	2,2
23	71,2	1,4
24	56,4	0,6
25	48,7	2,1
26	36,9	2,4
27	25,6	1,8
28	22,2	2,4



Rysunek 8.3 Wyniki pomiaru odległości metodą ultradźwiękową.

Wnioski i obserwacje z przeprowadzonego eksperymentu: Otrzymane wyniki pomiaru potwierdzają wyniki z eksperymentu 1: metoda ultradźwiękowa może być użyta do pomiaru ilości wody w zbiorniku.

c) Eksperyment 3: Pomiar metodą ultradźwiękową przy symulowaniu przyspieszania i hamowania maszyny sprzątającej.

W tabeli 8.3 przedstawiono wyniki pomiaru odległości czujnika od powierzchni wody metodą ultradźwiękową przy poruszaniu zbiornika oraz dla porównania wyniki z eksperymentu 2 (bez poruszania zbiornika).

Tabela 8.3. Porównanie wyników pomiaru metodą ultradźwiękową przy poruszaniu zbiornika i bez poruszania zbiornika

objętość [l]	Pomiar przy poruszania zbiornika		Pomiar bez poruszania zbiornika	
	średnia	odchylenie stand.	średnia	odchylenie stand.
5	271,7	8,7	268,8	1,0
10	214,2	7,1	212,8	2,3
15	162,5	6,8	156,9	2,2

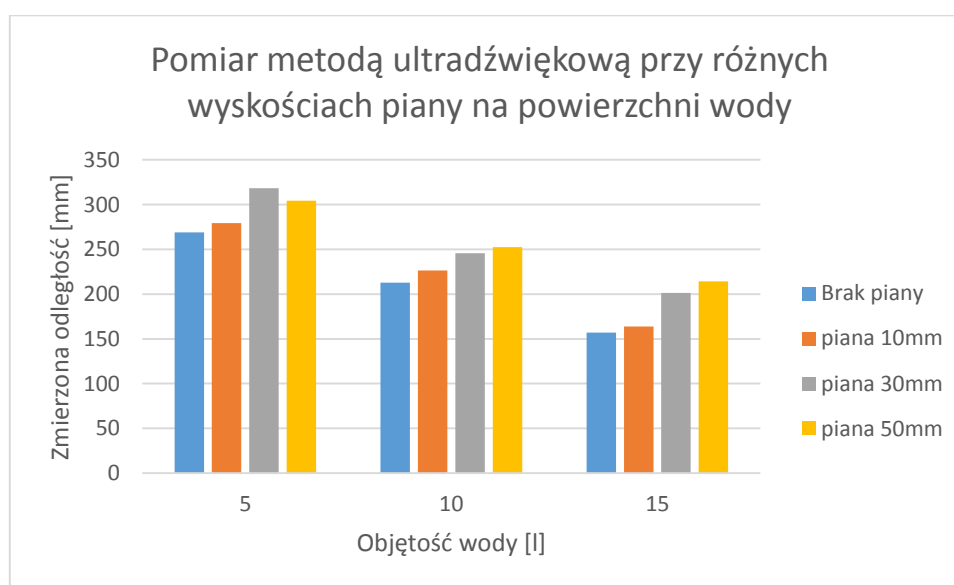
Wnioski i obserwacje z przeprowadzonego eksperymentu: Średnia z wyników uległa nieznacznej zmianie (do 3,5%) w stosunku do pomiaru bez poruszania zbiorników, zwiększyło się natomiast odchylenie standardowe. Hamowanie i przyspieszanie maszyny nie ma dużego wpływu na pomiar odległości metodą ultradźwiękową.

d) Eksperyment 4: Testowanie wpływu obecności piany na wyniki pomiaru metodą ultradźwiękową.

W tabeli 8.4 przedstawiono wyniki pomiaru odległości czujnika od powierzchni wody metodą ultradźwiękową przy obecności piany na powierzchni wody oraz dla porównania wyniki z eksperymentu 2 (przy braku piany na powierzchni wody). Wyniki pomiaru przedstawione są również na rysunku 8.4.

Tabela 8.4. Wyniki pomiaru odległości metodą ultradźwiękową przy obecności piany

objętość [l]	brak piany		wysokość piany 10mm		wysokość piany 30mm		wysokość piany 50mm	
	średnia [mm]	od. std. [mm]	średnia [mm]	od. std. [mm]	średnia [mm]	od. std. [mm]	średnia [mm]	od. std. [mm]
5	268,8	1,0	279,4	1,0	318,4	6,1	304,3	16,2
10	212,8	2,3	226,3	3,8	245,8	2,2	252,4	9,9
15	156,9	2,2	163,9	1,1	201,4	6,4	214,2	6,9



Rysunek 8.4. Wyniki pomiaru odległości metodą ultradźwiękową przy obecności piany

Wnioski: Obecność piany powoduje błędy w pomiarach metodą ultradźwiękową. Już niska piana powoduje nieduże błędy (do 7% w stosunku do braku piany na

powierzchni), dlatego metody można użyć tylko gdy nie jest wymagana duża dokładność. Rozwiązaniem problemu jest użycie do mycia środków chemicznych nisko pieniących.

e) Eksperyment 5: Pomiar ilości wody w zbiorniku metodą wagową.

W tabeli 8.5 przedstawiono wyniki pomiaru metodą wagową. Wyniki pomiaru zaprezentowane są na wykresie znajdującym się na rysunku 8.5.

Tabela 8.5. Wyniki pomiaru metodą wagową

Pomiar metodą wagową		
	napięcie [mV]	
objętość [l]	średnia	odchylenie standardowe
0	391,90	0,44
1	511,56	0,52
2	633,39	0,65
3	753,70	0,62
4	874,47	0,60
5	995,08	0,45
6	1116,50	0,38
7	1235,65	0,57
8	1356,34	0,47
9	1476,39	0,49
10	1595,42	0,15
11	1714,67	0,45
12	1834,90	0,46
13	1954,71	0,40
14	2076,87	0,70
15	2197,19	0,67
16	2317,48	0,60
17	2436,91	0,42
18	2555,32	1,15
19	2675,21	0,62
20	2796,60	0,56
21	2916,58	0,48
22	3035,31	0,63
23	3155,26	0,40
24	3276,28	0,46
25	3396,82	0,48
26	3516,05	0,38
27	3636,00	0,60
28	3753,43	1,01



Rysunek 8.5. Wyniki pomiaru metodą wagową

Wnioski i obserwacje z przeprowadzonego eksperymentu: System pomiarowy wykorzystujący do pomiaru metodę wagową może być użyty do pomiaru ilości wody w zbiorniku.

f) Eksperyment 6: Pomiar metodą wagową przy symulowaniu przyspieszania i hamowania maszyny sprzątającej.

W tabeli 8.6 przedstawiono wyniki pomiaru metodą wagową przy poruszaniu zbiornika oraz dla porównania wyniki z eksperymentu 5 (bez poruszania zbiornika).

Tabela 8.6. Porównanie wyników pomiaru metodą wagową przy poruszaniu zbiornika i bez poruszania zbiornika

	Pomiar przy poruszaniu zbiornika		Pomiar bez poruszania zbiornika	
	napięcie [mV]		napięcie [mV]	
objętość [l]	średnia	odchylenie stand.	średnia	odchylenie stand.
5	996,62	5,57	995,08	0,45
10	1599,17	8,6	1595,42	0,15
15	2200,44	10,04	2197,19	0,67

Wnioski: Średnia z wyników zmieniła się o mniej niż 0,5% w stosunku do pomiaru bez poruszania zbiorników, zwiększyło się natomiast odchylenie standardowe. Metoda wagowa z powodzeniem może być użyta do pomiarów przy przyspieszaniu i hamowaniu maszyny sprzątającej.

8.3. Kalibracja systemu pomiarowego

Zadaniem zbudowanego systemu pomiarowego jest przedstawienie ilości wody w zbiorniku w litrach. W tym celu po wykonanych wcześniej pomiarach została dokonana kalibracja systemu.

a) Metoda ultradźwiękowa

Kalibracja polega na przeliczeniu odległości czujnika pomiarowego od powierzchni wody na objętość wody w litrach. W tym celu ze wzoru 8.1 obliczone zostało jaka wysokość słupa wody przypada na 1 litr wody, a następnie ze wzoru 8.2 obliczone zostało jaka jest objętość wody w zbiorniku.

$$m = \frac{(D_{max} - D_{min})}{i} \quad (8.1)$$

$$V = \frac{D - D_{max}}{m} \quad (8.2)$$

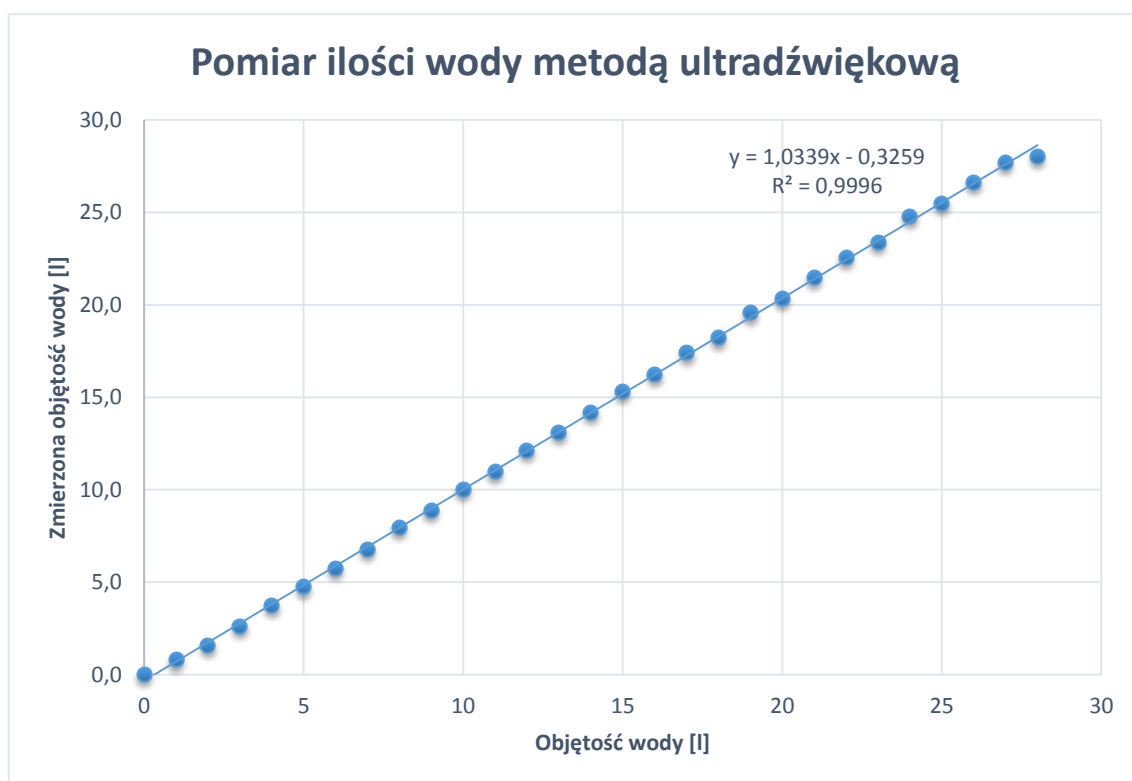
Gdzie: D_{max} – otrzymany wynik dla minimalnej objętości, D_{min} – otrzymany wynik dla maksymalnej objętości, D – odległość czujnika od wody, i - maksymalna objętość wody, m – wysokość słupa wody przypadająca na 1 litr wody, V – objętość wody dla odległości D

Po otrzymaniu wyników pomiarów w litrach obliczono błąd względem wzorca (naczynia z podziałką o pojemności 1l).

Wyniki przedstawione są w tabeli 8.7. Na podstawie wyników z tabeli wyrysowano wykres znajdujący się na rysunku 8.6.

Tabela 8.7. Wyniki pomiaru metodą ultradźwiękową po kalibracji.

objętość wzorcowa [l]	otrzymana objętość [l]	błąd względny [%]
0	0,0	0,0
1	0,8	20,1
2	1,6	21,9
3	2,6	12,2
4	3,7	6,3
5	4,8	4,9
6	5,7	4,2
7	6,8	3,0
8	7,9	0,7
9	8,9	1,1
10	10,0	0,3
11	11,0	0,3
12	12,1	1,1
13	13,1	0,6
14	14,2	1,3
15	15,3	2,0
16	16,2	1,4
17	17,4	2,4
18	18,2	1,2
19	19,6	3,0
20	20,3	1,7
21	21,5	2,2
22	22,6	2,5
23	23,4	1,7
24	24,8	3,3
25	25,5	2,0
26	26,6	2,4
27	27,7	2,5
28	28,0	0,0



Rysunek 8.6. Wyniki pomiaru metodą ultradźwiękową po kalibracji.

Wnioski: Otrzymany po kalibracji system pomiarowy wykorzystujący metodę ultradźwiękową może zostać użyty do wyznaczenia ilości wody w zbiorniku. Możliwe jest jednak poprawienie charakterystyki pomiarowej poprzez usunięcie błędu systematycznego pojawiającego się dla objętość wody w zbiorniku od 0 do 4 litrów. Powyżej 4 litrów wody w zbiorniku błąd względny jest mniejszy niż 5% wartości wzorcowej.

b) Metoda wagowa

Kalibracja polega na przeliczeniu napięcia otrzymanego z pomiaru na objętość wody w litrach. W tym celu ze wzoru 7.3 obliczono jakie napięcie przypada na 1 litr wody, a następnie ze wzoru 7.4 obliczono jaka jest objętość wody w zbiorniku.

$$n = \frac{(U_{max} - U_{min})}{j} \quad (8.3)$$

$$V = \frac{U - U_{min}}{n} \quad (8.4)$$

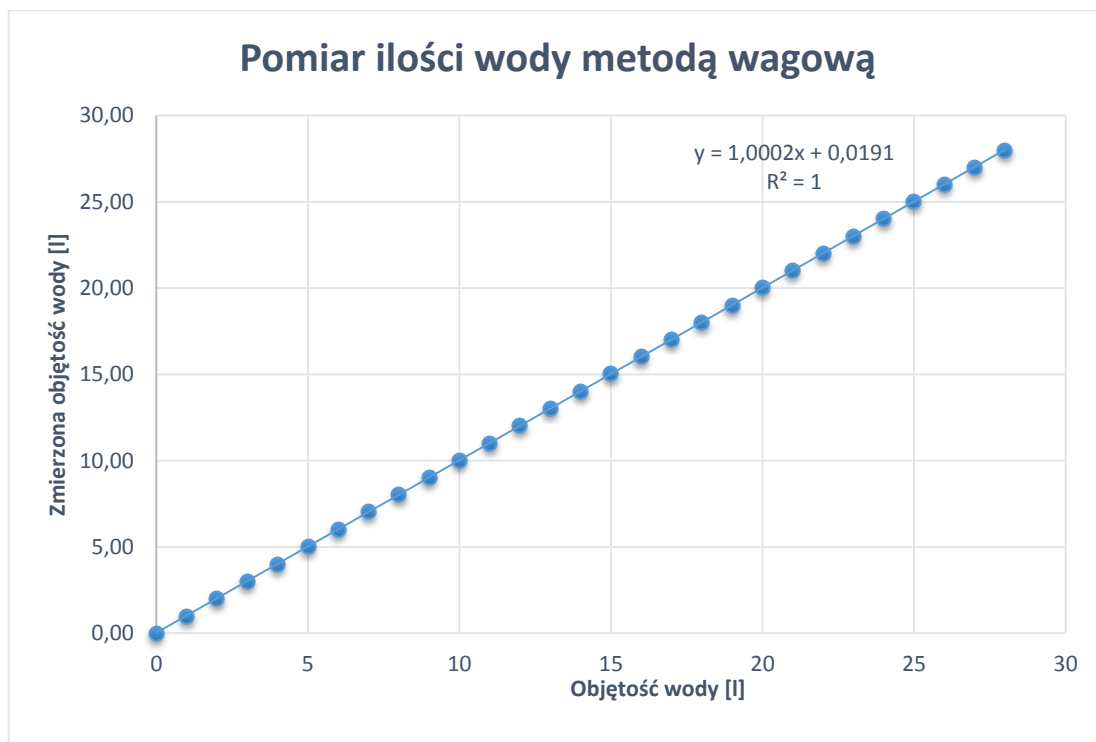
Gdzie: U_{min} – otrzymane napięcie dla minimalnej objętości, U_{max} – otrzymane napięcie dla maksymalnej objętości, U – zmierzone napięcie, j - maksymalna objętość wody, n – napięcie przypadająca na 1 litr wody, V – objętość wody dla napięcia U

Po otrzymaniu wyników pomiarów w litrach obliczono błąd względem wzorca (naczynia z podziałką o pojemności 1l).

Wyniki przedstawione są w tabeli 8.8. Na podstawie wynik Na podstawie wyników z tabeli wyrysowano wykres znajdujący się na rysunku 8.7.

Tabela 8.8. Wyniki pomiaru metodą wagową po kalibracji.

objętość wzorcowa[l]	otrzymana objętość [l]	błąd względny [%]
0	0,00	0,00
1	1,00	0,33
2	2,01	0,57
3	3,01	0,45
4	4,02	0,49
5	5,02	0,48
6	6,04	0,59
7	7,03	0,40
8	8,03	0,42
9	9,03	0,37
10	10,02	0,25
11	11,02	0,16
12	12,02	0,16
13	13,02	0,13
14	14,04	0,25
15	15,04	0,25
16	16,04	0,25
17	17,03	0,20
18	18,02	0,11
19	19,02	0,10
20	20,03	0,15
21	21,03	0,14
22	22,02	0,08
23	23,02	0,08
24	24,03	0,11
25	25,03	0,12
26	26,02	0,09
27	27,02	0,08
28	28,00	0,00



Rysunek 8.7. Wyniki pomiaru metodą wagową po kalibracji.

Wnioski: Otrzymany po kalibracji system pomiarowy wykorzystujący metodę wagową może zostać użyty do wyznaczenia ilości wody w zbiorniku. Maksymalny otrzymany błąd względny to 0,6% wartości wzorcowej.

9. Podsumowanie

W ramach pracy utworzony został system pomiarowy do pomiaru ilości cieczy w zbiornikach wykorzystujący dwie metody pomiarowe: ultradźwiękową i wagową. Spełniono wyznaczone cele – za pomocą systemu pomiarowego można zmierzyć ilość wody w zbiorniku z założoną dokładnością. Zbudowane zostało stanowisko pomiarowe wyposażone w niezbędne elementy do przetestowania wybranych metod pomiarowych w różnych warunkach pracy. Sprawdzenia poprawności działania systemu dokonano wykonując serię eksperymentów. Ukazano ograniczenia metody ultradźwiękowej w przypadku obecności piany na powierzchni wody. Wyniki pomiaru metodą wagową pokazują, że może być ona z powodzeniem użyta do zbadania ilości wody w zbiorniku i jest odporna na niesprzyjające warunki pomiaru. Wymaga ona jednak rozwiązania konstrukcyjnego pozwalającego na wykorzystanie belki tensometrycznej. W przeprowadzonych eksperymentach wykorzystano również czujniki krańcowe w celu ochrony przed przepełnieniem zbiorników.

Dalsza praca nad utworzonym systemem powinna obejmować przetestowanie innych czujników ultradźwiękowych, których parametry mogłyby okazać się lepsze od przedstawionego czujnika HC-SR04. Opracowany powinien zostać również łatwiejszy sposób montażu belki tensometrycznej, która mimo dobrych parametrów pomiarowych stwarza duże problemy podczas instalacji systemu.

System pomiarowy można zastosować w robocie sprzątającym. W zależności od konstrukcji mechanicznej zbiorników można zastosować jedną z dwóch przedstawionych metod pomiarowych. W rozwiązaniu docelowym zbiorniki warto wyposażyć w dodatkowe czujniki krańcowe sygnalizujące brak cieczy w zbiorniku lub jego przepełnienie. Wymagane jest zapewnienie bezawaryjnej pracy systemu i komunikacji między pozostałymi układami robota sprzątającego.

10. Bibliografia

[1] Strzelczyk Marek, *Pomiary poziomu cieczy i materiałów sypkich*, data publikacji: 18.02.2008, data dostępu: 5.01.2015

<http://automatykab2b.pl/technika/1213-pomiary-poziomu-cieczy-i-materialow-sypkich#.VM72oy6KTn->

[2] Webster John G., *Eren Halit Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook, Second Edition: Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement, rozdział 18: Level Measurement*, rok wydania: 2014

[3] Hambrice Kevin, Hopper Henry, *Leak/Level A Dozen Ways to Measure Fluid Level and How They Work*, data publikacji: 1.12.2004, data dostępu: 14.01.2015

<http://www.sensorsmag.com/sensors/leak-level/a-dozen-ways-measure-fluid-level-and-how-they-work-1067>

[4] College of Engineering Pune, *Measurement of level in a tank using capacitive type level probe*, data dostępu: 15.01.2015

<http://coep.vlab.co.in/?sub=33&brch=91&sim=449&cnt=1>

[5] College of Technology, *Instrumentation and Control Module, Rozdział 9: Level Measurement*, data dostępu: 13.01.2015

<http://www.isu.edu/estec/ic-ed-modules/Module-9-Level-Measurement.pdf>

[6] Żabicki Damian, *Metody pomiaru przepływu*, data publikacji: 05.08.2010, data dostępu: 10.01.2015

<http://www.utrzymanieruchu.pl/menu-gorne/artukul/article/metody-pomiaru-przeplywu/>

[7] Sarzyński Adam *Czujniki tensometryczne – czyli co o pomiarach siły powinien wiedzieć automatyk*, data publikacji: 16.06.2010, data dostępu: 15.12.2014

<http://automatykab2b.pl/technika/3095-czujniki-tensometryczne-czyli-co-o-pomiarach-siy-powinien-wiedzie-automatyk#.VM5hKy6KTn9>

[8] Kropiewnicka-Mielko Anna, *Pomiar poziomu materiałów sypkich. Metody i urządzenia*, data publikacji: 9.05.2014, data dostępu: 4.01.2015

<http://automatykaonline.pl/Artykuly/Pomiary/pomiar-poziomu-materialow-sypkich-metody-i-urządzenia>

[9] Senczyk Dominik, *Wyznaczenie poziomu cieczy lub materiałów sypkich z zbiornikach za pomocą promieniowania rentgenowskiego lub gamma*, data publikacji: 1.08.2010, data dostępu: 15.01.2015

<http://www.badania-nieniszczace.info/Badania-Nieniszczace-Nr-01-08-2010/Serwis-Badania-Nieniszczace-01-08-2010-art-nr5.html>

- [10] Siemens, *Przetworniki pomiarowe: kompletne rozwiązania do pomiaru poziomu*, data dostępu: 17.01.2015
https://www.automatyka.siemens.pl/docs/docs_ia/Broszura_SITRANS_L_pl.pdf
- [11] Endress+Hauser, *Pomiary poziomu cieczy i materiałów sypkich*, data dostępu: 6.01.2015
<https://portal.endress.com/wa001/dla/5000476/5625/000/00/CP023FPL-podrecznik-poziomyEH.pdf>
- [12] Dokumentacja czujników pływakowych EIEWIN, data dostępu: 26.01.2015
http://www.eiewin.com.pl/index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=17
- [13] Dokumentacja czujnika Vegacal 65, data dostępu: 26.01.2015
http://www.introl.pl/pl/katalog/plik/3151,168_vegacal_65_kk_pl_141205_int.pdf
- [14] Dokumentacja czujnika HONEYWELL 26PCCFA3D, data dostępu: 26.01.2015
<http://www.tme.eu/pl/Document/f82653f7967d3febc23117ac3a69853a/26pc.pdf>
- [15] Dokumentacja przepływomierza PRZ-1800/L, data dostępu: 26.01.2015
http://www.tme.eu/pl/Document/f0493476fbaf73724d322871cf7b7212/932-950xBxxx_GB_20V.pdf
- [16] Dokumentacja belki tensometrycznej BTENS-N1-035, data dostępu: 26.01.2015
<https://www.maritex.com.pl/media/uploads/products/se/NA1.pdf>
- [17] Dokumentacja czujnika Sitrans LR200, data dostępu: 27.01.2015
https://cache.automation.siemens.com/dnl/zE/zE0ODE4MwAA_29706536_HB/7ML19985XC81_1.pdf
- [18] Dokumentacja czujnika LB440, data dostępu: 27.01.2015
https://www.berthold.com/en/system/asset/product_data_sheet_lb_440.pdf
- [19] Dokumentacja czujnika FMP50, data dostępu: 27.01.2015
https://portal.endress.com/wa001/dla/5000327/6685/000/02/TI01000FEN_1311.pdf
- [20] Dokumentacja czujnika QS18VP6LDQ8, data dostępu: 27.01.2015
http://www.datasheetlib.com/datasheet/1262137/qs18vp6ldq8_banner-engineering/download.html
- [21] Dokumentacja czujnika HC-SR04, data dostępu: 27.01.2015
https://botland.com.pl/index.php?controller=attachment&id_attachment=476