

Politechnika Warszawska

W Y D Z I A Ł E L E K T R O N I K I
I T E C H N I K I N F O R M A C Y J N Y C H



Instytut Systemów Elektronicznych

Praca dyplomowa inżynierska

na kierunku Elektronika
w specjalności Elektronika i Fotonika

Bezprzewodowy czujnik do kontroli poziomu
w zbiornikach asenizacyjnych
z powiadomieniami w czasie rzeczywistym

Jakub Stankiewicz

Numer albumu 297333

promotor
dr inż. Sławomir Szostak

WARSZAWA 2025

Bezprzewodowy czujnik do kontroli poziomu w zbiornikach asenizacyjnych z powiadomieniami w czasie rzeczywistym

Streszczenie

Współcześnie brakuje ekonomicznych, bezprzewodowych i jednocześnie bezkontaktowych rozwiązań umożliwiających monitorowanie poziomu zapełnienia przydomowych zbiorników asenizacyjnych. W niniejszej pracy przedstawiono projekt układu odpowiadającego na te potrzeby. Opracowane rozwiązanie obejmuje dwa odrębne urządzenia: moduł pomiarowy wykorzystujący czujnik ultradźwiękowy do pomiaru poziomu cieczy oraz stację bazową; oba oparte o mikrokontroler z serii STM32WL z wbudowanym interfejsem radiowym LoRa. Przeprowadzone testy potwierdziły poprawne działanie modułów, które stanowią fundament do stworzenia kompleksowej platformy monitorowania, wpisującej się w ramy współczesnych systemów Internetu Rzeczy.

Słowa kluczowe: czujnik ultradźwiękowy, zbiornik asenizacyjny, Internet Rzeczy, interfejs LoRa, STM32WL, monitoring, komunikacja bezprzewodowa, pomiar bezkontaktowy, poziom cieczy.

Wireless sensor for monitoring septic tank levels with real-time notifications

Abstract

Nowadays, there is a lack of economical, wireless, and contactless solutions for monitoring the fill levels of domestic septic tanks. This thesis presents the design of a system addressing these needs. The developed solution consists of two separate devices: a measurement module employing an ultrasonic sensor for liquid level detection, and a base station — both built on STM32WL microcontrollers with an integrated LoRa radio interface. The conducted tests confirmed the correct operation of the modules, which lay a foundation for the development of a comprehensive monitoring platform fitting into the framework of modern Internet of Things systems.

Keywords: ultrasonic sensor, septic tank, Internet of Things, LoRa interface, STM32WL, monitoring, wireless communication, contactless measurements, fill level.

Spis treści

Wprowadzenie	7
Część I. Analiza stanu wiedzy i dobór narzędzi	9
1. Przegląd technik pomiarowych i istniejących rozwiązań	10
1.1. Poziomierze siłowe	11
1.2. Mierniki stosowane w zbiornikach asenizacyjnych	13
1.2.1. Rejestrator poziomu Wi-Fi RU Solid IP65	13
1.3. Porównanie gotowych rozwiązań	13
2. Założenia projektowe	15
Część II. Projekt i implementacja	17
3. Schemat blokowy urządzenia	18
4. Dobór elementów	19
4.1. Mikrokontrolery	19
5. Testy	22
5.1. Testy komunikacji bezprzewodowej	22
Podsumowanie	25
Bibliografia	27
Wykaz symboli i skrótów	28
Spis rysunków	29
Spis tabel	30
Załączniki	31

Wprowadzenie

Rozwój Internetu Rzeczy (IoT) jest jednym z głównych filarów Czwartej Rewolucji Przemysłowej. Z tego powodu inteligentne urządzenia elektroniczne zyskują coraz większą popularność, stopniowo dominując rynek konsumencki. Powstaje coraz więcej rozwiązań, których celem jest oszczędzanie czasu oraz ułatwianie użytkownikom codziennych czynności. Są to przykładowo obsługiwane zdalnie, z poziomu telefonu, czujniki temperatury, inteligentne programatory światel lub gniazdek, czy systemy zdalnej kontroli wizualnej. Rozwiązania niektórych problemów pozostawiają wciąż szerokie możliwości poprawy. Jednym z nich jest monitorowanie poziomu zapełnienia przydomowego zbiornika asenizacyjnego. Na terenach, do których nie została doprowadzona sieć kanalizacyjna, powszechnie jest instalowanie podziemnych, bezodpływowych zbiorników na ścieki. Rozwiązanie to stawia przed użytkownikiem szereg dylematów, począwszy od dobrania odpowiedniego umiejscowienia, poprzez kontrolowanie szczelności pojemnika i stopnia jego zapełnienia, aż do zaplanowania wywozu nieczystości. Następstwa związane z użytkowaniem nieszczelnego lub przepelenionego szamba są wielopoziomowe: bakteriologiczne, toksykologiczne i prawne. Konsekwencje natury prawnej wiążą się z karami pieniężnymi, w kwotach nawet do 500 złotych. W świetle obecnie rosnącego znaczenia ekologii, warto również zwrócić uwagę na problem, jakim jest przedostanie się do gruntu materiałów zakaźnych, takich jak wirusy, bakterie i pasożyty oraz toksycznych związków chemicznych. Zatrucie agresywną chemią może być trwałe i utrzymywać się latami. Konsekwencje są tym groźniejsze, im bliżej uszkodzonego zbiornika znajdują się cieki wodne czy studnie.

Analiza rynku konsumenckiego wykazała, że dostępne są gotowe rozwiązania opisanego problemu monitorowania poziomu zapełnienia przydomowego szamba. Tradycyjne podejścia najczęściej opierają się na rozwiązaaniach takich jak pływaki mechaniczne czy czujniki zanurzeniowe, i są obarczone szeregiem ograniczeń. Wspomniane urządzenia pomiarowe wymagają ciągłego kontaktu z medium w agresywnym środowisku, co prowadzi do ich stopniowego zużycia i potencjalnych awarii, a tym samym kosztownych dla użytkownika częstych przeglądów technicznych i wymian. Problem z tradycyjnymi metodami pojawią się również podczas regularnego opróżniania zbiornika, kiedy konieczne jest wcześniejsze wyjęcie czujnika lub zastosowanie specjalnych środków ostrożności w celu jego ochrony. Wprowadzenie bardziej zaawansowanych, bezkontaktowych metod pomiaru pozwoliłoby na poprawę komfortu użytkowników oraz na uproszczenie monitorowania przydomowego szamba. W wielu branżach coraz częściej stawia się na bezprzewodowe i energooszczędnne urządzenia elektroniczne. Stosowanie takich rozwiązań pozwala nie tylko na automatyzację procesu, ale również na integrację systemów z innymi urządzeniami w ramach Internetu Rzeczy (IoT – ang. *Internet of Things*). Przegląd dostępnych rozwiązań pozwolił wysnuć wniosek, że większość istniejących urządzeń do pomiaru poziomu zapełnienia zbiornika asenizacyjnego, choć skuteczna, nie spełnia wszystkich wymagań gospodarstw domowych. Wady, jakimi są obarczone, to najczęściej wysokie zużycie energii lub konieczność zasilania sieciowego, co znaczco ogranicza miejsca, gdzie możemy je zastosować.

Celem niniejszej pracy jest opracowanie energooszczędnego, bezprzewodowego urządzenia badającego poziom zapełnienia przydomowego zbiornika asenizacyjnego. Proponowane rozwiązanie wykorzystuje technologię ultradźwiękową, która, jak pokazano w następnym rozdziale pracy, gwarantuje wysoką dokładność, bez konieczności kontaktu czujnika z medium, jakim są ścieki kanalizacyjne.

Wykorzystanie zasilania baterijnego umożliwia stosowanie urządzenia w każdym miejscu, bez potrzeby stałego podłączenia do sieci elektrycznej. Ważnym aspektem projektu jest również modularność, czyli możliwość dostosowania urządzenia do potrzeb użytkownika poprzez zastosowanie innego rodzaju czujników poziomu. Dzięki modularności możliwa jest także łatwa wymiana poszczególnych elementów systemu, co pozytywnie wpływa na obniżenie kosztów serwisowania urządzenia i wydłużenie jego żywotności. Projekt zakłada poszukiwanie równowagi między jakością a ceną. Niniejsza praca ma na celu nie tylko do opracowania funkcjonalnego urządzenia, ale też do wykazania, że wbrew temu co sugerują dostępne na rynku urządzenia, możliwe jest połączenie takich cech jak energooszczędność, przystępna cena, niezawodność oraz modularność w jednym. Tym sposobem powstanie systemu, który nie tylko ułatwi obsługę szamb, ale także wpisze się w globalny trend automatyzacji, optymalizacji procesów monitorowania środowiska oraz rozwoju Internetu Rzeczy.

Część I.

Analiza stanu wiedzy i dobór narzędzi

1. Przegląd technik pomiarowych i istniejących rozwiązań

Metody pomiaru poziomu cieczy można podzielić między innymi na bezpośrednie i pośrednie [1]. Metody bezpośrednie wymagają obecności osoby, która może odczytać wartość pomiaru – odczyt jest wzrokowy. Metody pośrednie wykorzystują najczęściej jakieś urządzenie lub wielkość fizyczną, za pomocą których pośrednio można zmierzyć poziom cieczy.

Poziomierze do pomiaru **bezpośredniego**:

- wziernikowe,
- prętowe,
- sondujące:
 - strunowe,
 - taśmowe.

Poziomierze do pomiaru **pośredniego**:

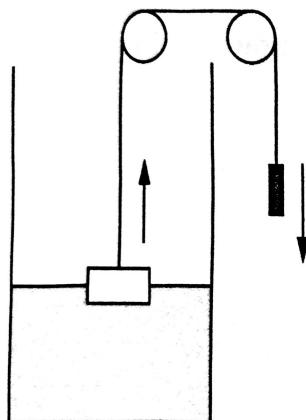
- siłowe:
 - pływakowe,
 - wyporowe,
 - wagowe,
- ciśnieniowe:
 - hydrostatyczne,
 - piezometryczne,
- elektryczne:
 - oporowe,
 - pojemnościowe,
- wykorzystujące fale mechaniczne:
 - akustyczne,
 - ultradźwiękowe,
- wykorzystujące fale elektromagnetyczne:
 - radarowe,
 - optyczne,
 - jądrowe.

W ramach niniejszej pracy zdecydowano się wykorzystać metody pozwalające na autonomiczne

działanie urządzenia. W związku z tym metody bezpośrednie w dalszej części przeglądu literaturowego zostaną pominięte.

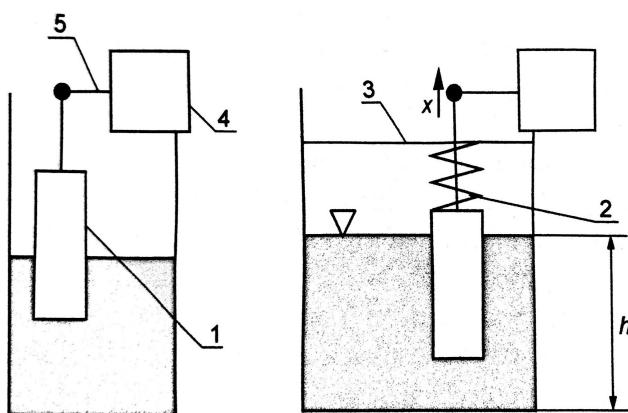
1.1. Poziomierze siłowe

Poziomierz pływakowy opiera swoje działanie na unoszącym się na powierzchni elemencie – pływaku, którego ruch, na przykład poprzez linię, przekłada się na przemieszczenie ciężarka lub innego przedmiotu będącego poza zbiornikiem, co pozwala uzyskać informację o szukanym poziomie cieczy – zgodnie ze schematem na rys. 1. Do ich zalet należą: prosta budowa, bardzo duże zakresy pomiarowe (do 40 metrów) i dokładność [1]. Do wad należy kontakt pływaka z badanym medium, co może doprowadzić z czasem do jego degradacji.



Rysunek 1. Schemat poziomierza pływakowego [1, s. 241]

Poziomierz wyporowy jest odmianą opisanego wcześniej poziomierza pływakowego. W tym wariantie na pływak 1 (rys. 2), działa pewna siła wyporu związanego z zanurzeniem, która jest następnie przekazywana za pomocą dźwigni 5 lub sprężyny 2 do czujnika 4 (na przykład tensometrycznego) i przeliczona na szukaną wielkość – poziom cieczy. Podstawa sprężyny zamocowana jest w miejscu 3. Zaletą takiego podejścia jest dokładność. Wadą jest fakt, że wskazanie zależy od gęstości cieczy [1].



Rysunek 2. Schemat poziomierza wyporowego [1, s. 242]

Poziomierz wagowy jest koncepcyjnie naprzostszym rozwiązaniem, ponieważ opiera się na pomiarze masy. Urządzenia te bazują na tensometrach i przekształcają przyłożoną siłę w postaci ciężaru ciała w sygnał elektryczny. Zaletami są wysoka dokładność, szeroki zakres pomiarowy, długowieczność oraz niska wrażliwość na zmiany temperatur [2]. W kontekście pomiarów zbiornika bezodpływowego zamontowanego pod ziemią istnieje jedna krytyczna wada czujników tensometrycznych – problemy z instalacją. Zbiornik na odpady musi zostać umieszczony na platformie wagowej lub innej strukturze, która umożliwi pomiar ciężaru tylko zbiornika wraz z zawartością.

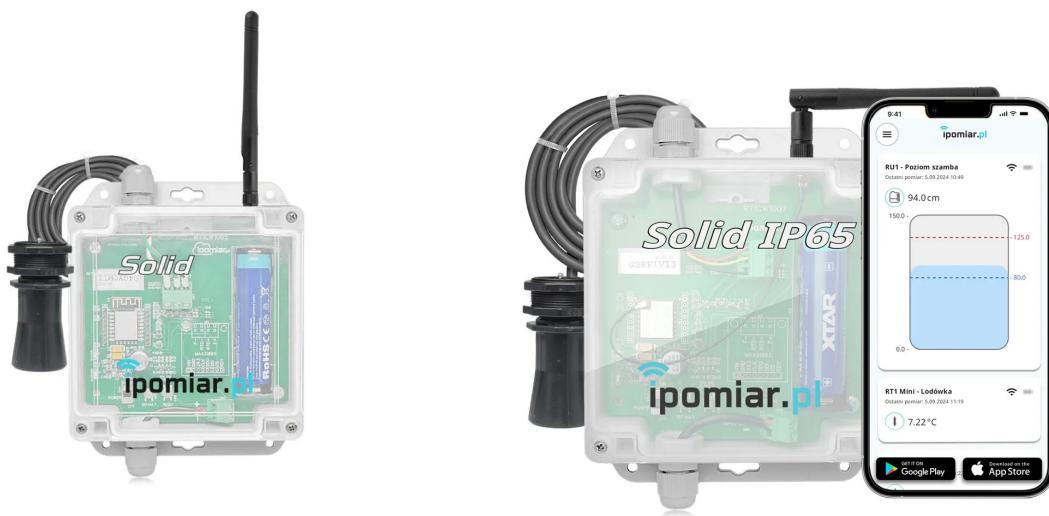
Opisane wyżej poziomierze siłowe nie nadają się do monitorowania poziomu wypełnienia w zbiornikach bezodpływowych. Wynika to z faktu, że zawartość zbiornika nie jest jednorodna – nie ma jednakowej gęstości, która wpływa między innymi na siłę wyporu nurnika, więc wskazania mogą być zniekształcone. Dodatkowo, na dnie szamba z czasem gromadzą się ciężkie zanieczyszczenia – kamień moczowy oraz osad denny, które są trudne do wypompowania [3]. Ich obecność może negatywnie wpłynąć na dokładność wskazania poziomierza wagowego. Ponadto, zastosowanie pływaka wymaga stworzenia dodatkowej infrastruktury – mechanizmu z liną oraz systemu przekształcającego przemieszczenie ciężarka połączonego z pływakiem na sygnał elektryczny.

1.2. Mierniki stosowane w zbiornikach asenizacyjnych

1.2.1. Rejestrator poziomu Wi-Fi RU Solid IP65

Czujnik firmy Termipol (rys. 3) z siedzibą w Lublińcu. Koszt około **800 PLN**. Specyfikacja techniczna:

1. czujnik ultradźwiękowy z gumowym przewodem o długości 5 m;
2. zakres pomiarowy: 28 — 750 cm;
3. zasilanie: akumulator PCM oraz zasilacz sieciowy 5V (w zestawie);
4. łączność: Wi-Fi 2,4 GHz;
5. zasięg komunikacji: do 150 m;
6. czas pracy na baterii: do 365 dni;
7. stopień ochrony: IP65;
8. warunki pracy: temperatura od -25°C do 60°C, wilgotność poniżej 80% RH;
9. typ pomiaru: ciągły.



Rysunek 3. Czujnik poziomu Wi-Fi RU Solid IP65

1.3. Porównanie gotowych rozwiązań

Analiza dostępnych na rynku rozwiązań wykazała brak urządzeń, które spełniałyby wszystkie przyjęte na wstępnie założenia. Najbardziej zaawansowany i jednocześnie oferujący bezkontaktowy pomiar czujnik – RU Solid IP65 oferuje szeroki zakres pomiarowy i zasięg rzędu 150 m, lecz czas pracy przy zasilaniu z baterii jest ograniczony, a cena najwyższa ze wszystkich. Rozwiązania płynawkowe, konduktancyjne i hydrostatyczne (np. Novabo, Signax, ALERT GM-S II, SZ-02) są koncepcyjnie prostsze, jednak wymagają kontaktu z medium, co stoi w sprzeczności z założeniami. W związku z powyższym, projektowany czujnik ma za zadanie wypełnić lukę rynkową: zapewnić pomiar bezkontaktowy, komunikację radiową o większym zasięgu niż Wi-Fi, niskie zużycie energii umożliwiające wieloletnią

pracę na baterii oraz cenę konkurencyjną lub niższą niż jakiegolokwiek czujnika. Zbiorcze porównanie czujników znajduje się w 1.

Tabela 1. Porównanie gotowych rozwiązań

Urządzenie	Czujnik	Interfejs	Zasięg	Żywotność	Cena [zł]
Wi-Fi RU Solid IP65	ultradźwiękowy	Wi-Fi 2,4 GHz	150 m	1 rok	800
SZ-02	hydrostatyczny	Wi-Fi 2,4 GHz	150 m	4 lata	599
Signax	konduktancyjny	radiowy 868 MHz	250 m	∞	335
ALERT GM-S II	konduktancyjny	przewodowy	100 m	∞	329
Novabo ^a	pływakowy/ konduktancyjny	przewodowy	5 m	∞	2339

^a Ta informacja wymaga wy tłumaczenia.

2. Założenia projektowe

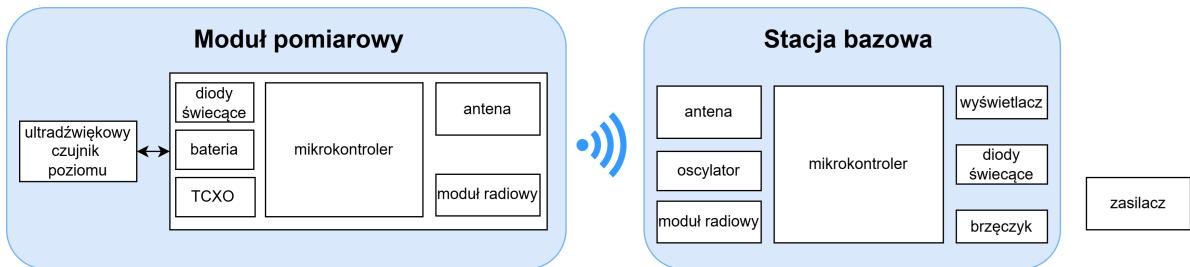
Na podstawie analizy istniejących rozwiązań oraz przeglądu literatury określono szereg wymagań technicznych, jakie powinno spełniać urządzenie. Wiadomo, że będzie pracowało w środowisku zewnętrzny, bez dostępu do sieci energetycznej lub innych źródeł energii. Dokładność odczytów poziomu szamba nie jest kluczowa i odchylenia rzędu centymetrów nie wpłyną na użyteczność systemu. Istotna z punktu widzenia potencjalnego nabywcy jest wygoda użytkowania, czyli urządzenie powinno być proste w instalacji oraz niewymagające serwisowania. Na tej podstawie sformułowano następujące główne założenia funkcjonalne i projektowe urządzenia:

- zasilanie baterijne,
- praca na baterii: minimum 5 lat,
- komunikacja bezprzewodowa,
- zasięg komunikacji: minimum 50 metrów,
- dokładność pomiaru: do 10 centymetrów,
- koszt: do 300 złotych.

Część II.

Projekt i implementacja

3. Schemat blokowy urządzenia



Rysunek 4. Schemat blokowy urządzenia

Pierwszym krokiem projektowym było stworzenie schematu blokowego urządzenia – rys. 4. Całe urządzenie składa się z dwóch modułów: pomiarowego oraz odbiorczego, zwanego stacją bazową. Moduł pomiarowy to urządzenie monitorujące poziom zbiornika, który przesyła informacje o stopniu zapełnienia do stacji bazowej. Jego najważniejszymi elementami są: czujnik ultradźwiękowy, mikrokontroler oraz temperaturowo kompensowany oscylator kwarcowy (ang. *temperature compensated crystal oscillator*, TCXO), o wyborze którego zadecydowały potencjalne wahania temperatury. Moduł ten składa się dodatkowo z:

- baterii,
- anteny,
- diod świecących.

TCXO według noty aplikacyjnej [4] jest droższym, lecz lepszym rozwiązaniem w porównaniu do standardowego oscylatora kwarcowego – szczególnie w kontekście dokładności oscylacji. Dzięki TCXO można osiągnąć mniejszy dryft (ang. *drift*). Zaletą tego rozwiązania jest możliwość pracy w węższym paśmie częstotliwości, co wiąże się ze zwiększeniem zasięgu transmisji. Mniejszy dryft powoduje, że środek pasma transmisyjnego znajduje się na oczekiwanej częstotliwości np. 868 MHz. W przypadku wąskiego pasma niewielki dryft spowoduje błąd i potencjalnie doprowadzi do rozbiegnięcia się pasm, w których dwa urządzenia się komunikują.

Stacja bazowa, podobnie jak moduł pomiarowy, również korzysta z mikrokontrolera oraz modułu radiowego. Jej zadaniem jest odbieranie danych wysyłanych przez moduł pomiarowy w trybie simplex oraz powiadamianie użytkownika o bieżącym stanie zapełnienia zbiornika. W tym celu wykorzystany został wyświetlacz LCD, brzęczyk oraz diody świecące. Na schemacie widoczny jest również zewnętrzny zasilacz, który nie jest częścią tej pracy.

4. Dobór elementów

W tej sekcji omówiono dobór kluczowych komponentów obu urządzeń, takich jak: czujnik ultradźwiękowy, mikrokontrolery z modułem radiowym, oscylatory oraz anteny. Pozostałe elementy zostały opisane przy okazji tworzenia schematów elektrycznych.

4.1. Mikrokontrolery

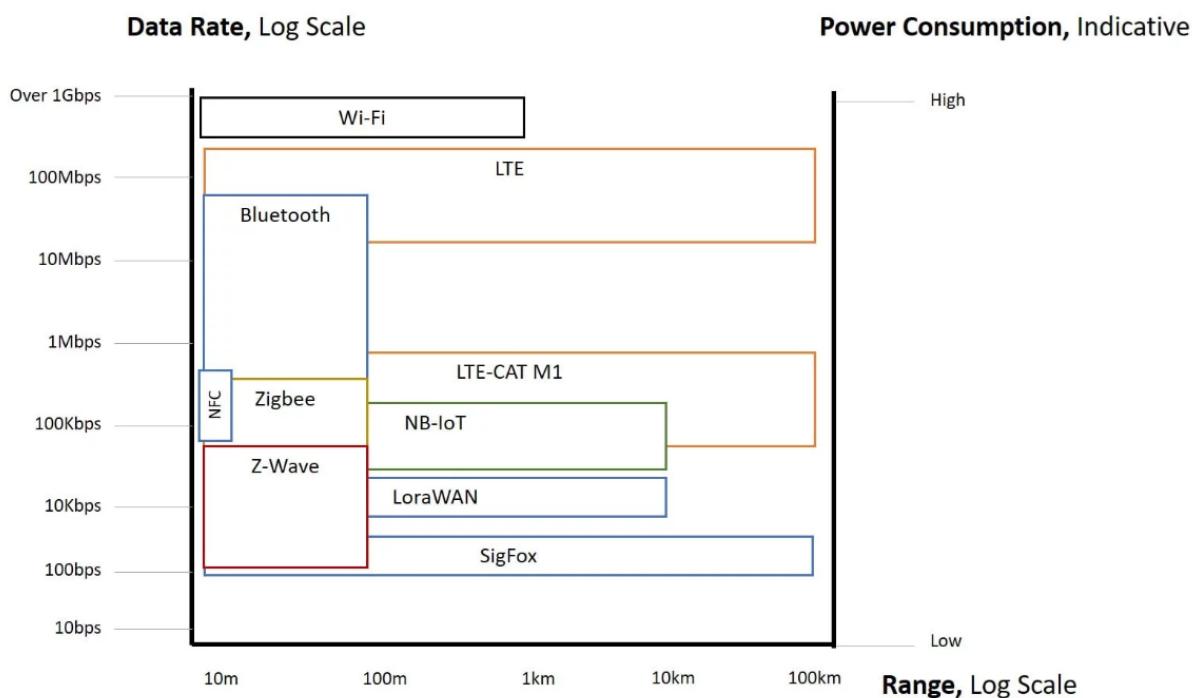
Przy wyborze mikrokontrolera najbardziej istotna były: energooszczędność, obsługiwane interfejsy – UART, I2C oraz wewnętrzne peryferia – ADC, dzięki którym można zrealizować podłączenie różnego rodzaju czujników ultradźwiękowych. Obecnie najbardziej rozpowszechnieni producenci mikrokontrolerów zostali wymienieni poniżej. Według danych na 2021 rok kontrolowali oni aż 82% globalnej sprzedaży według raportu przygotowanego przez portal IC Insights.

- NXP,
- Microchip,
- Renesas,
- STMicroelectronics,
- Infineon.

Ze względu na dużą ilość dokumentacji oraz materiałów pomocniczych, a także doświadczenie autora, zdecydowano się na układ STMicroelectronics. Producent ten ma w swojej ofercie układy integrujące mikrokontroler i moduł radiowy obsługujący system LoRa (ang. *Long Range*), który jest obok SigFox najbardziej energooszczędnym systemem komunikacji 5.

Rozwiązanie, w którym mikrokontroler i moduł radiowy są dwoma rozdzielonymi układami ma wady, ponieważ cena samego modułu radiowego to koszt w granicach od 20 do 30 złotych, gdzie koszt układów integrujących moduł radiowy jest podobny. Wiązałoby się to ze zwiększeniem skomplikowania i gabarytów obwodu drukowanego.

STMicroelectronics posiada jedną rodzinę mikrokontrolerów wspierających komunikację bezprzewodową i jest to **STM32WL**. W jej ramach można wyróżnić kilka podgrup układów zgodnie z rys. 6.



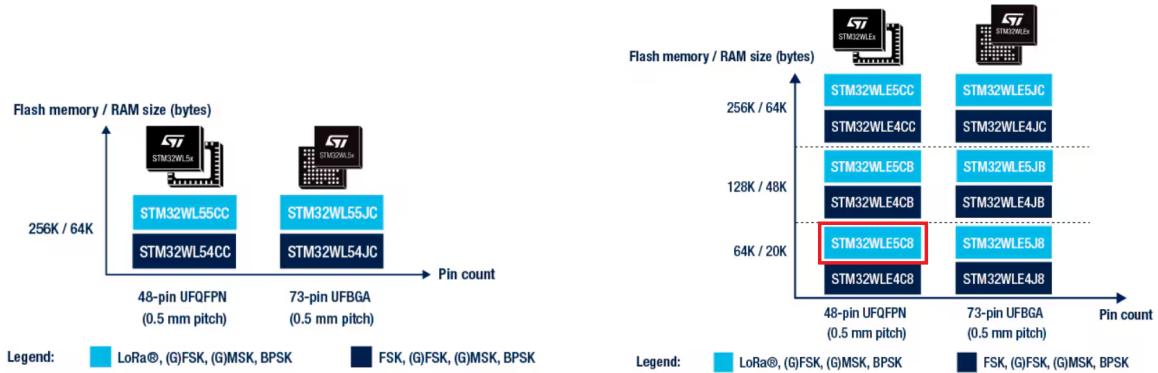
Rysunek 5. Zestawienie interfejsów według portalu neuronicworks.com



Rysunek 6. Rodzina STM32WL od STMicroelectronics

W projekcie przyjęto komunikację *LoRa P2P* (ang. *point-to-point*), umożliwiającą bezpośrednią wymianę danych pomiędzy dwoma urządzeniami bez udziału infrastruktury sieciowej. Jednocześnie przewidziano możliwość zastosowania standardu LoRaWAN (ang. *Long Range Wide Area Network*) w

przypadku przyszłej rozbudowy systemu lub konieczności zwiększenia jego zasięgu Stąd też rozważane były mikrokontrolery, które wspierają przytoczony wcześniej interfejs, czyli posiadające oznaczenie STM32WLx5xx (rys. 7). LoRaWAN to protokół sieciowy, który posiada własną, odrębną infrastrukturę – serwery, bramki i urządzenia końcowe. Dzięki niemu można połączyć urządzenia korzystające z techniki modulacji jaką jest LoRa będące w różnych miejscach na świecie.



Rysunek 7. Układy wspierające LoRaWAN. Po lewej WL55. Po prawej WLE5

Ostatecznie wybrany został STM32WLE5C8U6 – wróżony na rys. 7. Został użyty zarówno w stacji bazowej, jak i w module pomiarowym. Ma jeden rdzeń Cortex M4 oraz najmniejszą ilość pamięci z dostępnych możliwych: 65 KB flash i 20 KB RAM, co przekłada się na jego niską cenę około 18 złotych. Dodatkową zaletą jest to, że w ramach serii WLE5 w tej samej obudowie znajdują się jeszcze dwa układy, które posiadają kolejno 128 KB/48 KB i 256 KB/64 KB pamięci flash¹ i RAM^{2,3}, co może być przydatne w przypadku zwiększonego zapotrzebowania pamięci w przyszłości. Seria WL55 została odrzucona, ponieważ posiada tylko jedną wersję pamięciową.

¹ Pamięć flash w mikrokontrolerach to coś w rodzaju „twardego dysku na mikroskalę” — trzyma program nawet bez zasilania, ale każda komórka wytrzymuje tylko ograniczoną liczbę cykli kasowania. Dlatego dobry firmware traktuje flash z szacunkiem: zapisuje rzadko, rotuje sektory i dba, by nie zużyć najcenniejszego zasobu MCU szybciej niż potrzeba.

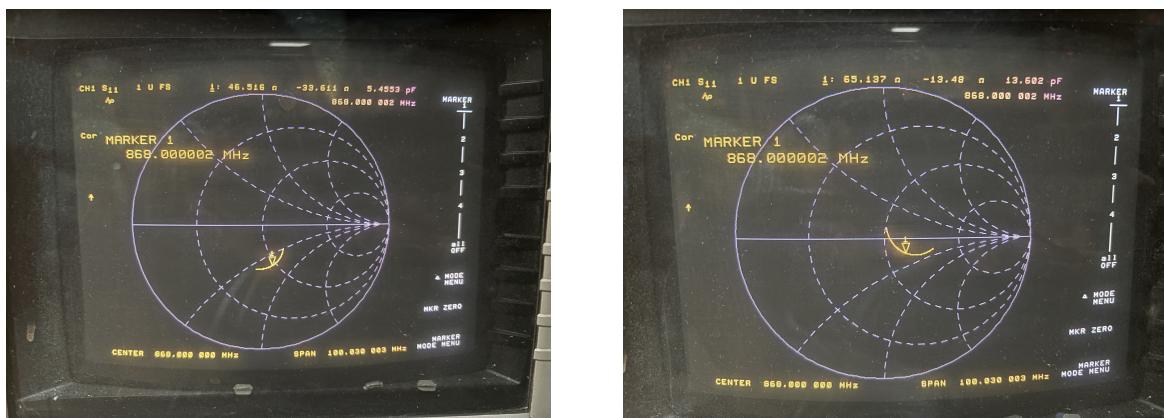
² RAM w mikrokontrolerze to najszybsze, ale i najbardziej kapryśne miejsce pracy programu — znika po odcięciu zasilania, więc każda awaria potrafi wyzerować całą „krótką pamięć” urządzenia w jednej chwili. Dlatego systemy krytyczne często trzymają ważne dane w rejestrach lub backup-RAM, a RAM traktują jak przestrzeń roboczą jednorazowego użytku.

³ W świecie MCU RAM bywa tak ciasny, że programista czasem czuje się jak zegarmistrz — każdy bajt jest na wagę złota, a nieoptymalna tablica potrafi „wysadzić” cały projekt. To właśnie dlatego w embedded tak popularne są techniki oszczędzania pamięci: statyczne bufore, unikanie alokacji dynamicznej i przechowywanie stałych w flashu zamiast w RAM-ie.

5. Testy

5.1. Testy komunikacji bezprzewodowej

Początkowo, bez żadnej optymalizacji, zasięg komunikacji bezprzewodowej wynosił około 10 metrów. Pierwszym krokiem było zbadanie dopasowania nowego toru radiowego do anteny. Zły poziom dopasowania obu układów poprawiono do akceptowalnego poziomu oraz upewniono się, że radia są skonfigurowane pod kątem maksymalnego zasięgu komunikacji. Na poniższych zdjęciach widoczne są wartości dopasowania impedancji zarówno przed, jak i po trymowaniu dla obu układów (rys. 8 i 9).



Rysunek 8. Rewizja druga – poziom dopasowania stacji bazowej przed (po lewej) i po trymowaniu (po prawej)



Rysunek 9. Rewizja druga – poziom dopasowania modułu pomiarowego przed (po lewej) i po trymowaniu (po prawej)

Tabela 2. Poziomy impedancji wejściowej przed i po dopasowaniu obwodu

urządzenie	impedancja przed dopasowaniem [Ω]	impedancja po dopasowaniu [Ω]
moduł pomiarowy	$46,5 - 33,6j$	$65,1 - 13,5j$
stacja bazowa	$44,2 - 36,7j$	$64,9 - 8,8j$

Istnieje pojęcie takie jak wskaźnik dopasowania toru (WDT). Odpowiednikiem WDT jest współczynnik odbicia Γ . W torach radiowych kluczowym etapem projektowania jest uzyskanie dopasowania impedancji pomiędzy wyjściem nadajnika Z_L a impedancją anteny Z_O . Niedopasowanie powoduje wzrost Γ , a tym samym zwiększenie mocy odbitej oraz pogorszenie efektywności promieniowania. Dla częstotliwości $f = 868,0 \text{ MHz}$ przyjmuje się, że dopasowanie jest akceptowalne, gdy moduł współczynnika odbicia spełnia warunek $\Gamma < 0,2$. Na podstawie zebranych wyników przeprowadzono obliczenia parametrów takich jak *SWR* (ang. *standing wave ratio*) oraz Γ do łatwiejszego oszacowania poziomu dopasowania toru.

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \frac{(46,5 - 33,6j)\Omega - 50\Omega}{(46,5 - 33,6j)\Omega + 50\Omega} \quad (1)$$

$$\Gamma = \frac{(-3,5 - 33,6j)\Omega}{(96,5 - 33,6j)\Omega} = 0,075 - 0,322j \quad (2)$$

Stąd moduł wyrażenia:

$$\Gamma = \sqrt{(0,075)^2 + (-0,322)^2} = 0,331 \quad (3)$$

Na tej podstawie *SWR*:

$$SWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} = \frac{1 + 0,331}{1 - 0,331} = 1,99 \quad (4)$$

Moc odbita od anteny wyraża się wzorem $P_{\text{odbita}} = |\Gamma|^2 \cdot 100\% = 0,331^2 \cdot 100\% = 10,9\%$.

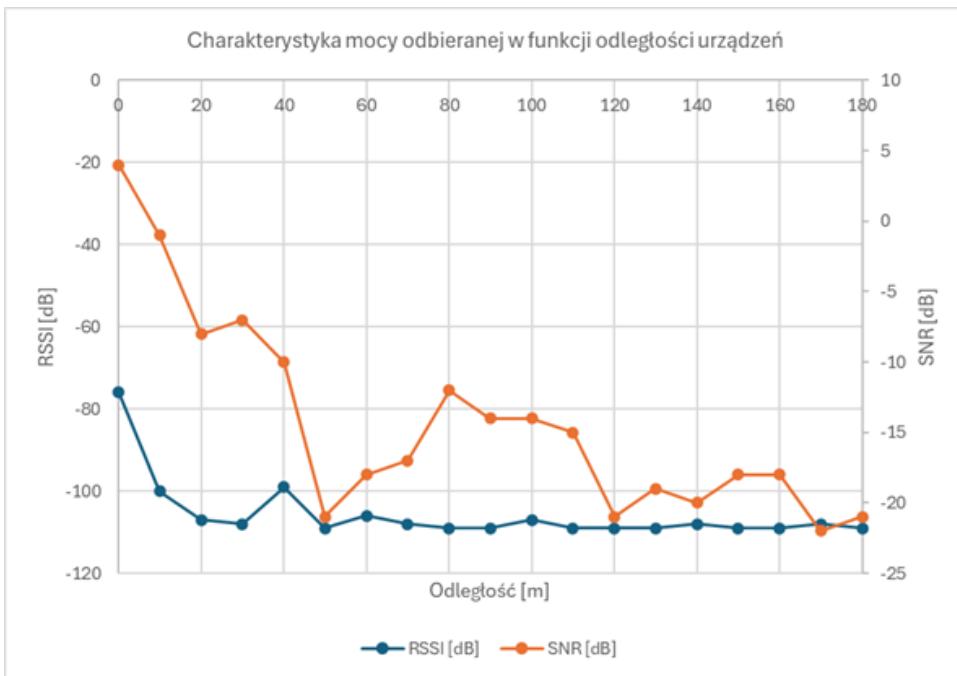
W identyczny sposób obliczono parametry dopasowania we wszystkich pozostałych trzech przypadkach. Wyniki zebrane w tabeli poniżej:

Tabela 3. Poziomy *SWR*, współczynnika odbicia i procent mocy strat modułów przed i po trymowaniu obwodu

urządzenie	SWR	$ \Gamma $	moc tracona [%]
przed dopasowaniem			
moduł pomiarowy	1,98	0,33	10,9%
stacja bazowa	2,16	0,37	13,5%
po dopasowaniu			
moduł pomiarowy	1,42	0,17	3,1%
stacja bazowa	1,35	0,15	2,3%

Kolejnym krokiem było sprawdzenie zasięgu komunikacji w terenie. Pomiary zostały wykonane w następujący sposób: stacja bazowa była trzymana przez jedną osobę, która odczytywała wyświetlane na ekranie wartości SNR, RSSI oraz flagi informujące o stanie komunikacji. Druga osoba oddalała się z odstępem 10 metrów wraz z modułem pomiarowym – aż do całkowitego zaniku komunikacji. Odległość między urządzeniami wyznaczana była przez aplikację zainstalowaną na telefonach obu osób biorących udział w teście. Pierwotnie spodziewano się, że komunikacja będzie działała na znacznie większym dystansie, rzędu jednego lub dwóch kilometrów. Okazało się jednak, że zanika przy 200

metrach. Wartości SNR oraz RSSI zebrane w trakcie testu przedstawiono na ilustracji.



Rysunek 10. Badanie zasięgu urządzenia

Przyczyną był prawdopodobnie fakt przeprowadzania testów na *zaszumionych* obszarach miejskich oraz trzymanie urządzeń nisko nad ziemią. Przeprowadzono test w skrajnie niekorzystnych warunkach, co oznacza że w docelowych lokalizacjach, w których przewiduje się eksploatację urządzeń, zasięg może być istotnie większy.

Podsumowanie

Na bazie przeprowadzonych testów stwierdzam, że założony cel pracy został osiągnięty. Powstałe urządzenie spełnia wszystkie założone wymagania techniczne, czyli umożliwia bezprzewodowy odczyt poziomu zapełnienia zbiornika asenizacyjnego oddalonego do 180 metrów, z zadaną dokładnością. Jest w stanie pracować bez przerwy przez ponad 5 lat bez wymiany baterii, a jego koszt oscyluje w granicach od 400 złotych przy produkcji jednostkowej do około 270 złotych przy zamówieniu tysiąca sztuk. (Koszt nie uwzględnia ceny wyprodukowania i montażu płytek PCB).

W trakcie testów gotowego urządzenia zauważylem problem związany z czujnikiem, który polegał na przeklamywaniu odczytów w zależności od umiejscowienia czujnika. Przyczyną był prawdopodobnie wielokrotnie odbijający się sygnał ultradźwiękowy, co można rozwiązać prostymi algorytmami przetwarzającymi dane. W najprostszym wypadku można zapamiętywać najmniejsze wskazania czujnika, albo korzystać ze średniej kroczącej odczytów. Uważam, że pomimo spełnienia wymagań jest jeden kluczowy aspekt, który wymaga poprawy i dalszych badań – jest to zasięg komunikacji. Przy konstruowaniu skupiłem się na optymalizacji kosztów, dlatego też użyłem najtańszych dostępnych komponentów. Wybór anteny kierunkowej o lepszych parametrach mógłby znacznie wpłynąć na poprawę osiągów. Można przewidzieć różne warianty urządzenia i założyć, że najtańsza wersja korzystałaby z obecnej anteny, a wersja lepsza z anteny kierunkowej – są to różne potencjalne strategie biznesowe, które można wykorzystać.

W przyszłości konieczne byłoby zapewnienie aktualizacji oprogramowania bezprzewodowo w ramach FUOTA (ang. *firmware update over the air*), co w oczywisty sposób podniosłoby komfort użytkowania. W przypadku systemu składającego się z kilkunastu, czy nawet kilkudziesięciu tego typu urządzeń, ręczna aktualizacja oprogramowania jest niedopuszczalna. Z punktu widzenia bezpieczeństwa modułu pomiarowego należało zastanowić się także nad wykorzystaną obudową. Obecna formuła, czyli druk 3D, może sprawdzić się w przypadku stacji bazowej, jednak moduł z czujnikiem wymaga obudowy, która będzie w najwyższych klasach szczelności IP, ponieważ otoczenie, w jakim pracuje sensor, jest potencjalnie niebezpieczne z powodu występowania w nim metanu [5], który jest gazem łatwopalnym i w stężeniach już od 5% do 15% może eksplodować. Stąd też na dalszych etapach rozwoju projektu powinna zostać rozważona możliwość zmiany obudowy. Możliwe jest również zalańie wnętrza obudowy żywicą – również celem zabezpieczenia samego urządzenia przed kopiowaniem rozwiązań.

Uważam, że urządzenie jest warte uwagi, ponieważ na rynku nie ma zbyt wielu podobnych rozwiązań, a na pewno nie ma takich, które spełniałyby postawione wymagania. Wynika to głównie z faktu, że większość z nich opiera się o przewodowy interfejs między czujnikiem a odbiornikiem, co jest mało wygodne. Dalszy rozwój obecnego projektu mógłby wiele zmienić. Kolejne wersje mogłyby korzystać z sieci LoRaWAN, co pozwoliłoby teoretycznie na pomiary w każdym miejscu, do którego dochodziłaby sieć. Niestannie rozwijający się rynek IoT wraz z technologiami LPWAN (ang. *low-power wide-area network*), do których należy również LoRaWAN, doprowadzi do masowej popularyzacji podobnych czujników, które nie muszą być obecne jedynie w przemyśle. Tanie czujniki bezprzewodowe dalekiego zasięgu to coś, co może przynieść wiele pozytku. W przyszłości możliwe byłoby rozszerzenie funkcjonalności urządzenia o pomiary dodatkowych parametrów takich jak temperatura, wilgotność

lub obecność szkodliwych gazów, co zwiększyłoby jego atrakcyjność dla potencjalnego użytkownika, a także uniwersalność. Integracja z aplikacją mobilną lub chmurową zapewniłaby maksymalny poziom komfortu i urządzenie nie odstawałoby w ten sposób od współczesnych czujników oferowanych przez duże firmy. Projekt stanowi solidną podstawę do dalszego rozwoju systemów zdalnego monitorowania, które mogą znaleźć zastosowanie między innymi także w rolnictwie.

Bibliografia

- [1] Buchczik, D., Ilewicki, W., Piotrowski, J., Waluś, S., Wyżgolik, R. i Źelezik, J., Pomiary poziomu, W: J. Piotrowski (red.), *Pomiary. Czujniki i metody pomiarowe wybranych wielkości fizycznych i składu chemicznego* (ss. 237–257), (wyd. 2), Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2017. ISBN: 978-83-01-19288-4
- [2] What is a weight sensor, what are the different types of sensors and how do they work? URL (dost. 26.01.2024): <https://www.futek.com/weight-sensor?srsltid=AfmB0opU1NIvMSHFwHaJo9KgWmrmoa0fLayqeBjebFOYealcs2dtCIur>
- [3] Zastosowanie mikroorganizmów w szambach i oczyszczalniach przydomowych. URL (dost. 26.01.2024): <https://eko-natural.com/2018/01/18/zastosowanie-mikroorganizmow-szambach-oczyszczalniach-przydomowych/>
- [4] STMicroelectronics, AN5646: How to select a 32 MHz HSE oscillator for STM32WL5x/Ex MCUs, Nota aplikacyjna, ver. 2, 2023. URL (dost. 02.01.2025): https://www.st.com/resource/en/application_note/an5646-how-to-select-a-32-mhz-hse-oscillator-for-stm32wl5xex-mcus-stmicroelectronics.pdf
- [5] Biofos: Czy szambo może eksplodować? URL (dost. 27.01.2024): <https://biofos.pl/blog/czy-szambo-moze-eksplodowac/>

Wykaz symboli i skrótów

TCXO temperaturowo kompensowany oscylator kwarcowy (ang. *temperature compensated crystal oscillator*)

WDT wskaźnik dopasowania toru

Spis rysunków

1. Schemat poziomierza pływakowego [1, s. 241]	11
2. Schemat poziomierza wyporowego [1, s. 242]	11
3. Czujnik poziomu Wi-Fi RU Solid IP65	13
4. Schemat blokowy urządzenia	18
5. Zestawienie interfejsów według portalu <i>neuronicworks.com</i>	20
6. Rodzina STM32WL od <i>STMicroelectronics</i>	20
7. Układy wspierające LoRaWAN. Po lewej WL55. Po prawej WLE5	21
8. Rewizja druga – poziom dopasowania stacji bazowej przed (po lewej) i po trymowaniu (po prawej)	22
9. Rewizja druga – poziom dopasowania modułu pomiarowego przed (po lewej) i po trymowaniu (po prawej)	22
10. Badanie zasięgu urządzenia	24

Spis tabel

1. Porównanie gotowych rozwiązań	14
2. Poziomy impedancji wejściowej przed i po dopasowaniu obwodu	22
3. Poziomy SWR, współczynnika odbicia i procent mocy strat modułów przed i po trymowaniu obwodu	23

Załączniki