

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA I TECHNOLOGIE
KOSMICZNE
NAUKI INŻYNIERYJNO-TECHNICZNE

Rozprawa doktorska

mgr inż. Tomasz Kabala

**Opracowanie inteligentnych bezprzewodowych czujników
i układów pomiarowych dedykowanych Internetowi Rzeczy
w laboratoriach testów komponentów lotniczych**

Promotor
dr hab. inż. Jerzy Weremczuk

WARSZAWA 2024

Streszczenie

Od przełomowego momentu pierwszego lotu samolotu w 1903 roku lotnictwo rozwija się nieustannie. Postęp osiągany jest nie tylko poprzez rozwój technik projektowania i wytwarzania, ale także poprzez coraz doskonalsze techniki badania komponentów. Obecnie znajdujemy się na początku IV rewolucji przemysłowej, w której inteligentne rozwiązania bezprzewodowe dedykowane Internetowi Rzeczy wkracają w nowe obszary przemysłu. Mimo to wykorzystanie bezprzewodowych przetworników inteligentnych w laboratoriach lotniczych jest obecnie bardzo ograniczone, co było motywacją do rozpoczęcia badań w tym obszarze. Ograniczenia wynikają z krótkiego czasu działania, niewystarczającej funkcjonalności, braku kompatybilności z systemami sterowania lub zbyt wysokich kosztów wdrożenia. Prezentowane badania mają na celu rozwiązanie tych problemów i sprawdzenie, czy szersze zastosowanie bezprzewodowych czujników inteligentnych w obszarze laboratoriów lotniczych usprawni proces testowania. W celu jak najszerzego przedstawienia możliwości inteligentnych bezprzewodowych przetworników i układów pomiarowych zaproponowano trzy oddzielne obszary badań: przetworniki współpracujące z typowymi czujnikami stosowanymi w laboratoriach, ustawniki pozycyjne i systemy detekcji wycieków. Przeprowadzono badania literaturowe dotyczące laboratoriów lotniczych, budowy przetworników inteligentnych oraz każdego z wytypowanych obszarów. W części projektowej pracy zaproponowano cztery oddzielne projekty, które mogą być elementami jednego systemu kontrolno-pomiarowego. Część projektowa pracy rozpoczyna się od projektu uniwersalnego przetwornika o niskim zużyciu energii, który może współpracować z czujnikami typowymi dla laboratoriów lotniczych. Zaprojektowany przetwornik może pracować przez miesiące, korzystając z baterii o małych rozmiarach i wykonując pomiary z wysoką dokładnością. Drugi projekt dotyczy telemetrii dedykowanej testom komponentów wysokoobrotowych. Proponowane rozwiązanie pokazuje, jak wdrożyć wysokoobrotowy, zasilany indukcyjnie, bezprzewodowy przetwornik temperatury przy zachowaniu niskich kosztów. W trzecim projekcie zaproponowano inteligentny bezprzewodowy sterownik ustawnika pozycyjnego współpracującego z zaworem regulacyjnym. Urządzenie to umożliwia ustawnikowi pozycyjnemu osiągnięcie wysokiej dokładności regulacji stopnia otwarcia lub przepływu przy długim czasie pracy baterii. Ostatnim badanym zagadnieniem było wykrywanie wycieków płynów na stanowiskach badawczych. Zaproponowano system oparty na metodach widzenia komputerowego, który ma wysoką skuteczność wykrywania wycieków. Wszystkie proponowane rozwiązania mogą komunikować się poprzez protokół Bluetooth Low Energy i pracować w sieci o topologii gwiazdy. Badania zakończono przykładem wdrożenia systemu w laboratorium z wykorzystaniem środowiska LabVIEW. W każdym z obszarów przedstawiono nowe podejście do testowania komponentów lotniczych z wykorzystaniem inteligentnych bezprzewodowych przetworników, co przyczyniło się do usprawnienia pracy laboratoriów.

Słowa kluczowe: przetworniki inteligentne, Internet Rzeczy, lotnictwo, pomiary

Abstract

Since the breakthrough moment of the first airplane flight in 1903, aviation has been developing continuously. Progress is achieved not only through the development of design and manufacturing techniques, but also through increasingly improved testing techniques. We are currently at the beginning of the 4th industrial revolution, in which smart wireless solutions dedicated to the Internet of Things are entering new areas of industry. Despite this, the use of wireless smart transducers in aviation laboratories is currently very limited, which was the motivation to start research in this area. The limitations result from short operating time, insufficient functionality, lack of compatibility with control systems or very high implementation costs. The presented research aims to solve these problems and check whether the wider use of wireless smart transducers in the area of aviation laboratories will improve the testing process. In order to present the possibilities of wireless smart transducers and smart measurement systems as broadly as possible, three separate areas of research are proposed: transducers cooperating with typical sensors used in laboratories, valve positioners and leak detection systems. Literature research was conducted on aviation laboratories, construction of smart transducers and each of the selected areas. In the design part of the work, four separate projects were proposed, which can be elements of one control and measurement system. The design part of the work begins with the design of a universal low-power transducer, which can cooperate with sensors typical for aviation laboratories. The designed transducer can work for months, using small batteries and taking measurements with high accuracy. The second project concerns telemetry dedicated to high-speed component tests. The proposed solution shows how to implement a high-speed, inductively powered, wireless temperature transducer at low cost. The third project proposed an intelligent wireless controller of a positioner cooperating with a control valve. This device allows the positioner to achieve high accuracy of opening or flow regulation with long battery life. The last issue studied was the detection of fluid leaks on test stands. A system based on computer vision methods was proposed, which has high leak detection efficiency. Each of proposed solutions could communicate via Bluetooth Low Energy protocol and work in a star topology network. The research was concluded with an example of system implementation in a laboratory using the LabVIEW environment. In each of the areas, new approaches to testing aircraft components using smart transducers were presented, which contributed to numerous improvements.

Keywords: smart transducers, IoT, aviation, measurements

Spis treści

1	Wstęp	7
1.1	Charakterystyka badań wykonywanych w laboratoriach lotniczych	9
1.2	Cel, teza oraz koncepcja pracy	14
1.3	Układ pracy	17
2	Potencjalne obszary wdrożenia inteligentnych rozwiązań kontrolno-pomiarowych w laboratoriach lotniczych	18
2.1	Przetworniki pomiarowe	18
2.2	Ustawniki pozycyjne	24
2.3	Systemy detekcji wycieków	27
3	Inteligentne czujniki i układy pomiarowe	31
3.1	Struktura bezprzewodowych przetworników inteligentnych	33
3.2	Mikrokontrolery, moduły komunikacyjne i komputery jednopłytkowe	34
3.3	Bezprzewodowe sieci czujnikowe	36
3.4	Metody zasilania	40
3.5	Komunikacja układów cyfrowych	46
3.6	Przetworniki analogowo-cyfrowe	48
3.7	Podstawy metod analizy obrazu w detekcji zmian	49
3.7.1	Przetwarzanie wstępne	50
3.7.2	Segmentacja	52
3.7.3	Analiza cech obrazu i klasyfikacja	56
4	Inteligentne przetworniki pomiarowe dedykowane pracy w laboratoriach komponentów lotniczych	57
4.1	Inteligentny bezprzewodowy przetwornik pomiarowy	58
4.1.1	Założenia projektowe	58
4.1.2	Struktura systemu	59
4.1.3	Projekt PCB	61
4.1.4	Komunikacja bezprzewodowa i struktura programu	62
4.1.5	Kontrola pracy układu ADC i obsługa czujników	65
4.1.6	Badania funkcji pomiarowych układu	72
4.1.7	Optymalizacja zużycia energii	74
4.1.8	Badanie radiowego zasilania bezprzewodowego	77
4.1.9	Badania systemu na stanowisku testowania komponentów	78

4.1.10	Podsumowanie	80
4.2	Inteligentny bezprzewodowy przetwornik temperatury dedykowany testom wysokoobrotowych komponentów wirujących	81
4.2.1	Założenia projektowe	81
4.2.2	Struktura systemu	84
4.2.3	Projekt PCB	86
4.2.4	Program sterujący i komunikacja	91
4.2.5	Badania prototypów	92
4.2.6	Podsumowanie	99
4.3	Inteligentny bezprzewodowy przetwornik kontrolujący pracę zaworów	100
4.3.1	Założenia projektowe	100
4.3.2	Struktura systemu	102
4.3.3	Projekt PCB	103
4.3.4	Sterowanie pracą silnika	105
4.3.5	Funkcje pomiarowe ustawnika pozycyjnego	106
4.3.6	Układ regulacji	107
4.3.7	Badania zaprojektowanego sterownika	110
4.3.8	Podsumowanie	118
4.4	Inteligentny układ detekcji wycieków na stanowiskach badawczych	119
4.4.1	Założenia projektowe	119
4.4.2	Struktura układu	120
4.4.3	Wykrywanie wycieków na podstawie detekcji konturu zmiany	121
4.4.4	Monitorowanie wybranych obszarów	125
4.4.5	Podsumowanie	129
4.5	Przykładowy sposób wdrożenia systemu	130
4.5.1	Założenia projektowe	130
4.5.2	Komunikacja przetworników z komputerem	131
4.5.3	Przygotowany program kontrolno-pomiarowy	133
4.5.4	Podsumowanie	134
5	Podsumowanie efektów pracy doktorskiej	135
	Bibliografia	138
	Spis rysunków	150
	Spis tabel	154
	Spis załączników	155

Rozdział 1

Wstęp

Za początek historii lotnictwa samolotowego przyjmuje się 17 grudnia 1903 roku, kiedy to odbył się pierwszy lot zakończony pomyślnym lądowaniem [1]. Od tego przełomowego momentu technika lotnicza rozwija się nieustannie, przekraczając kolejne bariery technologiczne. Postęp jest osiągany nie tylko poprzez ciągłe doskonalenie metod projektowania oraz technik wytwarzania i sterowania, ale również dzięki rozwojowi w obszarze badań komponentów lotniczych. Badania takie pozwalają wykryć na odpowiednio wczesnym etapie błędy projektowe lub powstające podczas produkcji, co w wielu przypadkach zapobiega wprowadzeniu wadliwych podzespołów do eksploatacji. Świadomość konstruktorów na temat potrzeby testowania rosła na przestrzeni lat, również poprzez analizy przyczyn awarii i katastrof lotniczych. Na skutek coraz większego nacisku na bezpieczeństwo, testowanie jest obecnie jednym z najważniejszych etapów wprowadzania nowych komponentów lotniczych do użytku, a transport lotniczy stał się jednym z najbardziej bezpiecznych [2]. Postęp jest widoczny szczególnie gdy porówna się współczynnik IFSD (ang. *In Flight Shutdown*), mówiący o liczbie awaryjnych wyłączeń w stosunku do czasu pracy silnika, dla wczesnych silników odrzutowych oraz tych wykorzystywanych obecnie. W przypadku wczesnych silników turbowentylatorowych współczynnik ten wynosił około $40 \times 10^{-5}/\text{godz.}$, a dla tych eksploatowanych obecnie dochodzi do $0,1 \times 10^{-5}/\text{godz.}$ [3]. Przemysł lotniczy pełni szczególną rolę ponieważ korzysta z najnowszych osiągnięć z poszczególnych obszarów techniki, a wprowadzane innowacje często są inspiracją do zmian w sposobie projektowania przedmiotów codziennego użytku. Nie inaczej było również w przypadku rozwoju laboratoriów testujących komponenty lotnicze, które w pełni wykorzystwały potencjał drugiej (elektryfikacja) i trzeciej (komputeryzacja) rewolucji przemysłowej. Laboratoria lotnicze są wyposażone w wysokiej klasy komputerowe systemy kontrolno-pomiarowe pozwalające symulować warunki eksploatacji podzespołów i wykonywać pomiary z wysoką precyzją, często również według zaprogramowanego cyklu testu, bez manualnej kontroli przez operatora. Obecnie stoimy u progu czwartej rewolucji przemysłowej, u której podstaw leży rozwój metod komunikacji pomiędzy urządzeniami, pozwalający na nowe podejście do zarządzania informacją [4]. Dodatkowe pomiary rejestrowane przez urządzenia połączone

w sieć są wykorzystywane nie tylko do optymalizacji produkcji i monitorowania stanu urządzeń, ale również w innych obszarach takich jak transport, logistyka, medycyna, nowoczesne budownictwo i wielu innych. Umiejętność zarządzania informacją stała się koniecznym i skutecznym środkiem transformacji przedsiębiorstw i otaczającego nas świata [5]. Jest to możliwe dzięki rozwojowi technik pomiarowych, a w szczególności czujników inteligentnych, posiadających wbudowane funkcje komunikacyjne i przetwarzania danych [6]. Maszyny przemysłowe, urządzenia codziennego użytku oraz ludzie i zwierzęta wyposażone w tego rodzaju czujniki mogą stać się elementami sieci Internetu Rzeczy, a zatem sieci wzajemnie komunikujących się obiektów [7, 8]. Termin Internet Rzeczy (ang. *IoT, Internet of Things*) został po raz pierwszy użyty podczas mowy Petera T. Lewis-a w Waszyngtonie w 1985 roku i został opisany jako sposób na integrację ludzi, procesów i technologii z urządzeniami i czujnikami mającymi możliwości komunikacyjne, w celu zapewnienia zdalnego monitorowania, manipulacji i śledzenia trendu zmian [9]. Pojęcie Internetu Rzeczy zdobyło jednak większą popularność dopiero w 1999 roku, gdy zostało użyte podczas prezentacji firmy Procter and Gamble do określenia sieci połączonych ze sobą przedmiotów, w odniesieniu do obiektów wyposażonych w znaczniki RFID (ang. *Radio-Frequency identification*) pozwalających na monitorowanie przepływu produktów [10]. Od tamtego czasu koncepcja połączonych urządzeń rozwija się nieustannie i obecnie jest w niej widziana podstawa kolejnej transformacji przemysłowej. W ostatnich latach obserwowany jest znaczny rozwój elektroniki w kierunku ułatwienia wdrażania technologii IoT w kolejnych obszarach gospodarki [11]. Nowoczesne protokoły komunikacyjne pozwalają odejść od dedykowanych standardów stosowanych wcześniej przez producentów urządzeń i w znacznym stopniu zwiększyć ich wzajemną kompatybilność. Mikroprocesorowe moduły komunikacyjne dzięki wysokiej wydajności pełnią często jednocześnie funkcję głównego elementu zarządzającego pracą urządzenia przy małych wymiarach i wysokim poziomie integracji. Zmniejszenie zapotrzebowania na energię pozwala wkraczać rozwiązaniom IoT do nowych obszarów [12]. Równolegle rozwijają się metody przetwarzania danych, a w szczególności sposoby analizy obrazu pozwalające na dokładniejsze autonomiczne monitorowanie pracy maszyn i urządzeń przy wykorzystaniu czujników inteligentnych [13]. Wszystkie te usprawnienia pozwalają patrzeć optymistycznie na perspektywy szerszego wdrożenia bezprzewodowych czujników inteligentnych w obszarze laboratoriów lotniczych, gdzie sprawne wykonywanie pomiarów jest warunkiem powodzenia kampanii testowej i późniejszej bezpiecznej eksploatacji badanych komponentów. Każdy z obszarów wdrożenia inteligentnych czujników dedykowanych IoT wymaga jednak odrębnego rozpatrzenia ze względu na swoją specyfikę, a w szczególności tak istotny obszar jakim są badania laboratoryjne komponentów lotniczych. Zatem, aby w pełni wykorzystać potencjał jaki oferuje wdrożenie inteligentnych czujników i w obszarze laboratoriów lotniczych, konieczne jest przeprowadzenie badań, które pozwolą zidentyfikować potrzeby laboratoriów i wskażą możliwe obszary usprawnień. Praca jest realizacją planu badawczego przedstawionego w załączniku 1.

1.1 Charakterystyka badań wykonywanych w laboratoriach lotniczych

Sprawne i wiarygodne przeprowadzanie badań komponentów jest niezbędne do zapewnienia bezpieczeństwa eksploatacji konstrukcji lotniczych. Wyniki testów mają bezpośredni wpływ na nakładane limity temperaturowe, obciążeniowe lub zmęczeniowe, a w wielu przypadkach są podstawą do przeprojektowania podzespołów. Badania wykonywane w laboratoriach lotniczych mają bardzo zróżnicowany charakter [14, 15], ze względu na odmienne role testowanych komponentów (rys. 1.1). Do najbardziej spektakularnych i skomplikowanych testów możemy zaliczyć testy silników na hamowniach, gdzie badana jest m.in. siła ciągu silnika. Testy tego typu są przygotowywane przez miesiące, a czasami nawet lata i prowadzone



(a) Testy silnika na hamowni



(b) Testy w komorze próżniowej



(c) Testy w tunelu aerodynamicznym

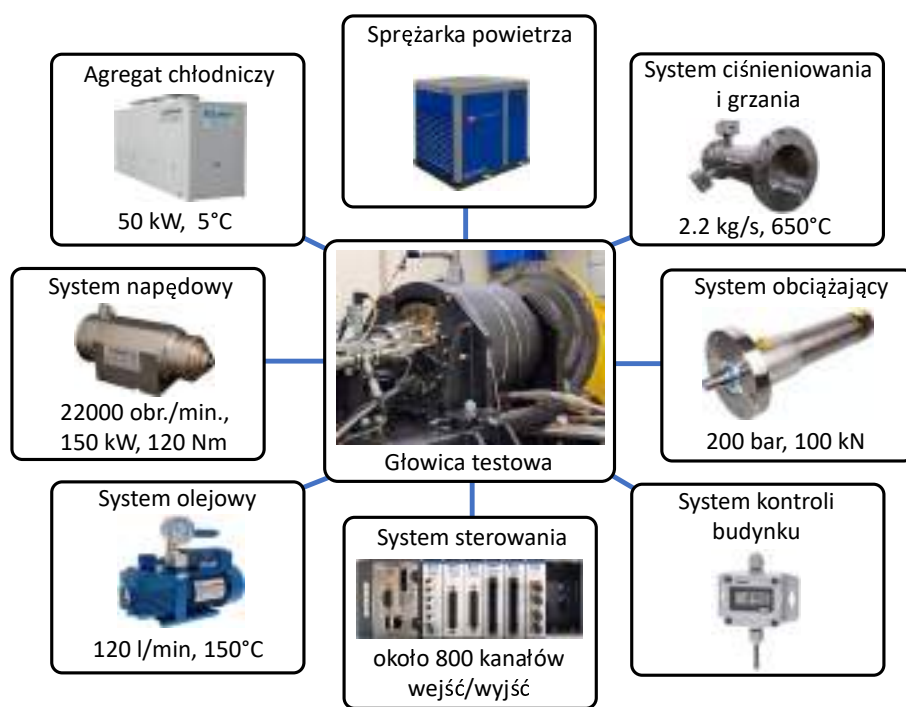


(d) Testy podwozia samolotu

Rysunek 1.1. Przykładowe stanowiska testowe

przez wieloosobowe zespoły, w celu dokładnego monitorowania parametrów pracy silnika. Są to jedne z ostatnich badań nowego modelu silnika przed rozpoczęciem prób wykonywanych podczas lotu. Testy tak skomplikowanych komponentów jak silnik, kadłub, podwozie czy skrzydła samolotu są poprzedzone szeregiem testów poszczególnych elementów składowych wykonywanych przez laboratoria lotnicze z całego świata, ponieważ projekty lotnicze mają zazwyczaj charakter międzynarodowy [16]. Powszechne jest przekazywanie komponentów pomiędzy laboratoriami w celu uzupełnienia badań w obszarze obsługiwanym przez dane laboratorium. Występuje zatem wiele rodzajów i grup laboratoriów lotniczych m.in. laboratoria

testujące materiały stosowane w lotnictwie, laboratoria testujące podzespoły obrotowe, laboratoria prób środowiskowych, laboratoria aerodynamiki, laboratoria testujące podwozia samolotów, laboratoria systemów sterowania i wiele innych [17, 18]. Laboratoria lotnicze wyróżniają się na tle innych jednostek badawczych zróżnicowaniem skali przeprowadzanych testów. Występują proste nieskomplikowane stanowiska testowe oraz wielosystemowe instalacje z oddzielnymi pomieszczeniami wydzielonymi do obsługi poszczególnych obszarów stanowiska. W znacznej liczbie przypadków stanowisko testowe składa się z kilku współpracujących ze sobą systemów np. systemu olejowego, systemu pneumatycznego, systemu obciążeniowego, systemu napędowego. Przykładem takich instalacji testowych mogą być stanowiska do testów układów olejowych stosowanych w silnikach lotniczych, ponieważ wymagają one ciśnieniowania głowic testowych poprzez dostarczanie gorącego powietrza, kontroli przepływu i temperatury oleju oraz wysokich prędkości obrotowych. W wielu przypadkach każdy z systemów ma swój niezależny układ sterowania współpracujący z głównym systemem kontrolno-pomiarowym. Stanowiska buduje się w taki sposób żeby mogły spełniać jak najszerszy zakres wymagań badawczych (rys. 1.2). Nie da się jednoznacznie scharakteryzować testów komponentów



Rysunek 1.2. Struktura stanowiska do testów obrotowych w Instytucie Lotnictwa

wykonywanych w laboratoriach lotniczych, większość z nich można jednak przyporządkować do jednej z dwóch grup testów, w których badana jest wydajność i funkcjonalność lub wytrzymałość na cykle pracy. Podczas testów wydajnościowych sprawdzane są limity pracy poszczególnych komponentów. Przykładowo, dla łożysk będzie to minimalny przepływ oleju smarującego lub maksymalna temperatura pracy nie powodująca uszkodzenia łożyska. Testy tego typu są zazwyczaj krótsze od testów gdzie wykonywane są cykle pracy i składają się z serii punktów testowych, w których zmieniane są parametry pracy badanego komponentu.

Podczas tego rodzaju badań generuje się skrajne warunki pracy lub nawet doprowadza się do celowego uszkodzenia obiektu badań, żeby potwierdzić limity pracy zakładane przez konstruktorów [19]. Zdarza się, że przeprojektowanie lub budowa nowego stanowiska trwa długo w wyniku trudności w odwzorowaniu skrajnych warunków pracy. Ze względu na brak możliwości wcześniejszego przewidzenia przebiegu testu oraz znaczne zróżnicowanie kolejnych punktów pomiarowych, testy tego typu są zazwyczaj przeprowadzane w trybie ręcznego lub półautomatycznego sterowania stanowiskiem, gdzie operator odpowiada za każdą wykonywaną operację. Testy, w których sprawdzane jest postępujące zużycie zazwyczaj są definiowane przez liczbę powtarzanych cykli pracy lub czas pracy przy określonych warunkach i prowadzone w trybie automatycznym, według wcześniej przygotowanego programu [20]. Testy łożysk składają się z nawet 30000 cykli pracy trwających 10-20 minut, które odwzorowują zmianę prędkości, temperatury, przepływu oleju i siły osiowej podczas startu, lotu oraz lądowania. Ze względu na to, że testy są przeprowadzane w sposób automatyczny, bez ciągłej obserwacji przez zespół laboratorium, istotna jest prawidłowa konfiguracja poziomów alarmowych zapewniająca wyłączenie awaryjne stanowiska. Źródłem wyłączenia może być przekroczenie ustalonych poziomów na najistotniejszych kanałach pomiarowych informujących o kondycji obiektu testowego lub awaria infrastruktury stanowiska. Przypadkowe uszkodzenie obiektu testowego w wyniku awarii stanowiska może zniszczyć efekty wielomiesięcznych badań. Zarówno monitorowanie obiektu testowego jak i infrastruktury badawczej jest zadaniem trudnym ze względu na problemy z przewidzeniem scenariusza awarii. Zmiany charakteru pracy stanowiska w oczywisty sposób identyfikowane przez wprawionego operatora często są trudne w identyfikacji w sposób automatyczny przez system kontrolno-pomiarowy, co w szczególności dotyczy wycieków oleju i innych płynów oraz gazów na stanowisku testowym (rys. 1.3). Uzasadniony wydaje się rozwój systemów automatycznego monitorowania pracy stanowisk testowych. W większości laboratoriów możemy wyróżnić część stałą infrastruktury i systemu pomiarowego, która stanowi bazę stanowiska testowego oraz część



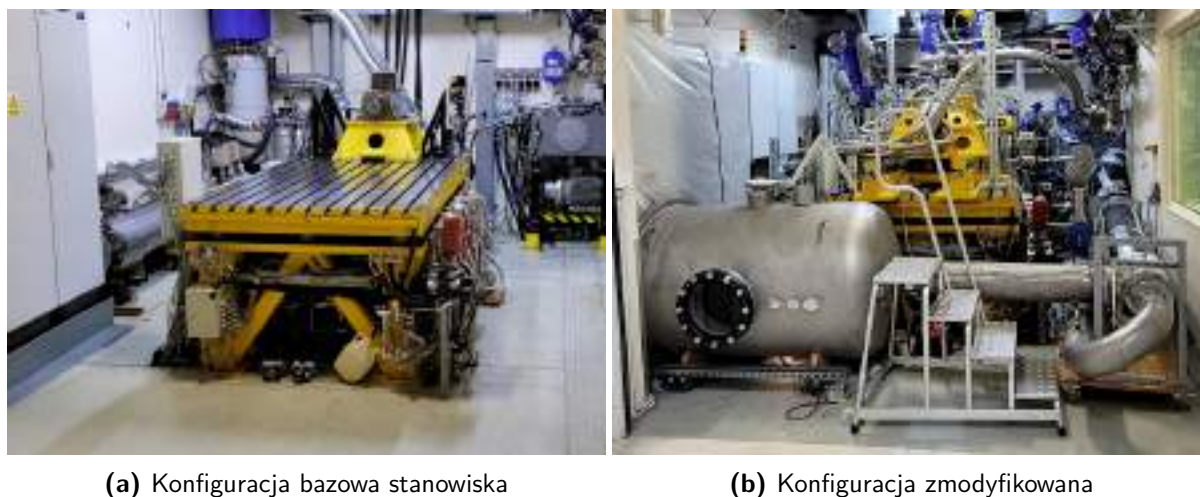
(a) Wyciek oleju spowodowany uszkodzeniem złączki



(b) Wyciek gorącego powietrza

Rysunek 1.3. Przykładowe wycieki na stanowisku badawczym

zmienną przygotowywaną na potrzeby konkretnych testów. Powszechne jest projektowanie stanowisk badawczych zgodnie z wymaganiami konkretnego testu i późniejsze rozbudowywanie o nowe możliwości testowe oraz wprowadzanie znacznych zmian w trakcie trwania kampanii testowej, mających na celu poprawę odwzorowania rzeczywistych warunków eksploatacji komponentów i dokładniejsze przeprowadzenie pomiarów. W wielu przypadkach uzyskanie docelowych warunków pomiarowych wymaga przeprowadzenia szeregu zmian w obszarze



Rysunek 1.4. Efekt rozbudowy stanowiska badawczego na potrzeby jednego z testów

infrastruktury i instrumentacji stanowiska (rys. 1.4). Częste zmiany konfiguracji infrastruktury stanowisk generują znaczny nakład pracy związany ze zmianami w instrumentacji, a zatem i prowadzeniem przewodów do szaf kontrolno-pomiarowych. Zmiany dotyczą nie tylko elementów pomiarowych, ale również zaworów regulacyjnych odpowiadających za ustawienie odpowiednich warunków badania. Ciągłe rozbudowy stanowisk testowych są również sposobem na wydłużenie czasu eksploatacji infrastruktury badawczej. Niektóre ze stanowisk badawczych np. tunele aerodynamiczne funkcjonują w ten sposób od dziesięcioleci [21]. Każdorazowa budowa instalacji testowej od początku nie jest możliwa ze względu na wielomilionowe koszty. Istotne jest zatem poszukiwanie sposobów prostej adaptacji stanowisk testowych do nowych wymagań badawczych oraz projektowanie laboratoriów w sposób umożliwiający późniejsze rozbudowy. W szczególności systemy pomiarowe powinny oferować elastyczne podejście do konfiguracji torów pomiarowych, zapewniające obsłudze laboratorium proste dostosowanie systemu do zmiennego charakteru testów. Zarejestrowane dane są głównym „produktem” laboratoriów, zatem poprawna konfiguracja torów pomiarowych jest kluczowym elementem z punktu widzenia powodzenia testów, co przekłada się na późniejszy poziom bezpieczeństwa eksploatacji testowanych komponentów [2, 3]. Wiarygodność pomiarów wykonywanych przez laboratoria ma kluczowe znaczenie, dużą uwagę przykładą się zatem do zachowania spójności pomiarowej, w szczególności w testach certyfikacyjnych komponentów [22]. Z tego względu do zadań osób zajmujących się instrumentacją pomiarową należy przeprowadzanie cyklicznych sprawdzeń i wzorcowań. Jedną z największych różnic w stosunku do opomiarowania linii



Rysunek 1.5. Czujniki typowe dla instrumentacji lotniczych stanowisk badawczych

przemysłowych jest znacznie większa liczba czujników przypadająca na powierzchnię instalacji. W zależności od charakteru badań podczas testów lotniczych może być używane od kilku do nawet kilkuset czujników pomiarowych. Pomimo dużego zróżnicowania testów w laboratoriach lotniczych można wskazać grupy czujników, które są wykorzystywane przy większości badań m.in. termoelektryczne czujniki temperatury (inaczej termopary), rezystancyjne czujniki temperatury (ang. *RTD, Resistance Temperature Detectors*), czujniki ciśnienia, czujniki wibracji, tensometry, przepływomierze, czujniki siły (rys. 1.5). Można odnaleźć tylko pojedyncze przykłady prób wdrożenia bezprzewodowych sieci czujników i układów pomiarowych w obszarze lotniczych laboratoriów badawczych [23], chociaż postęp w tym zakresie jest widoczny w innych gałęziach gospodarki. W większości przypadków czujniki transmitują pomiary w postaci sygnałów napięciowych i prądowych lub znacznie rzadziej z wykorzystaniem przewodowych protokołów komunikacyjnych. Sieci przewodowe są wykorzystywane głównie do komunikacji pomiędzy sterownikami i przesyłania zarejestrowanych danych do macierzy dyskowych. Głównym obszarem, gdzie używa się bezprzewodowego przesyłania informacji jest telemetria wykorzystywana do pomiarów parametrów pracy elementów obrotowych [24, 25]. Są to jednak zazwyczaj rozbudowane i kosztowne systemy nie pracujące w strukturze sieci z innymi urządzeniami w laboratorium. Koszty tego typu rozwiązań przy wielu kanałach pomiarowych liczone są w setkach tysięcy, co nie zawsze mieści się w zakładanych budżetach testów. Zazwyczaj laboratoria zlokalizowane w różnych krajach konkurują pomiędzy sobą o możliwość przeprowadzenia badań. Zwiększenie możliwości testowych przy jednoczesnym zredukowaniu kosztów może przyczynić się do wzrostu zainteresowania polskimi laboratoriami badawczymi. Powyżej krótko przedstawiona charakterystyka testów i pomiarów wykonywanych w laboratoriach lotniczych daje ogólny obraz sposobu przeprowadzania badań i jest punktem wyjścia do zaplanowania koncepcji prac nad inteligentnymi czujnikami i układami pomiarowymi dedykowanymi zastosowaniu w laboratoriach lotniczych.

1.2 Cel, teza oraz koncepcja pracy

Jak wskazano w poprzednim rozdziale, możemy wyróżnić dwie główne grupy testów wykonywanych w laboratoriach lotniczych: testy krótkoterminowe, w których potwierdzane są parametry lub sprawdzane limity komponentów oraz testy długoterminowe, w których symulowana jest rzeczywista lub zaburzona eksploatacja testowanego obiektu. Doświadczenia zebrane podczas przeglądu literatury i ponad dziesięciu lat pracy w laboratoriach lotniczych pozwoliły na wytypowanie zagadnień najbardziej istotnych dla zespołów przygotowujących i obsługujących testy komponentów lotniczych w obu obszarach. Dla testów krótkoterminowych, charakteryzujących się dużą zmiennością infrastruktury pomiędzy kolejnymi kampaniami testowymi, będzie to uproszczenie sposobu przygotowywania instrumentacji poprzez redukcję liczby przewodów oraz uproszczenie procedur zapewniających zachowanie spójności pomiarowej, przez skrócenie torów pomiarowych i zwiększenie ich mobilności pomiędzy laboratoriami. Zredukowanie kosztów telemetryi obrotowej może również znacznie zmniejszyć całkowity koszt przygotowania testów komponentów wirujących. Obecnie obserwowany jest utrudniony dostęp do rozwiązań telemetrycznych, w tym telemetryi obrotowej, wynikający z wysokiego kosztu wdrożenia i niewystarczającej funkcjonalności dostępnych na rynku rozwiązań, co ma wpływ na obie grupy badań. Oprócz rozwoju bezprzewodowych przetworników pomiarowych istotne jest również podjęcie próby wprowadzenia elementów wykonawczych sterowanych bezprzewodowo. Bez takich działań efekt wprowadzenia inteligentnych bezprzewodowych przetworników pomiarowych będzie ograniczony ze względu na konieczność prowadzenia przewodów do ustawników zaworów, których położenie w instalacji testowej również jest zmienne. W przypadku testów długoterminowych największym problemem są ograniczone możliwości monitorowania stanowisk badawczych. Skrajne warunki pracy sprzyjają powstawaniu trudnych do wykrycia wycieków, które mogą zakłócać pomiary przepływu i generować straty oraz uszkodzenia elementów składowych stanowiska badawczego lub testowanego obiektu. Uszkodzenie takie może być przyczyną utraty efektów badań i przerwania kampanii testowej. Na rynku brakuje systemów, które w pełni rozwiązują powyżej zidentyfikowane problemy badawcze, co było motywacją do rozpoczęcia badań w każdym z wytypowanych zakresów. Z przeprowadzonego przeglądu wiedzy wynika, że wykorzystanie przetworników inteligentnych dedykowanych pracy w sieci IoT może w znacznym stopniu rozwiązać wytypowane zagadnienia. Obecny poziom i dostępność rozwiązań z zakresu elektroniki pozwala na wprowadzenie inteligentnych bezprzewodowych czujników i układów pomiarowych, przy niskim koszcie wdrożenia, dzięki czemu są one stosowane w wielu obszarach gospodarki. Specyfika testów wykonywanych w laboratoriach lotniczych uniemożliwia jednak bezpośrednie wykorzystanie technologii projektowanych dla innych obszarów techniki i stwarza konieczność przeprowadzenia odrębnych badań.

Cel prac badawczych

Celem prowadzonych prac badawczych jest analiza możliwości wdrożenia inteligentnych rozwiązań dedykowanych IoT w laboratoriach testujących komponenty lotnicze oraz proponowanie innowacyjnych rozwiązań w tym zakresie. Badania mają odpowiedzieć na pytanie, w jaki sposób skorzystać z potencjału jaki oferują inteligentne czujniki i układy pomiarowe oraz jak wdrożyć te rozwiązania w obszarze laboratoriów testujących komponenty lotnicze, tak żeby mogły one współgrać z istniejącą infrastrukturą stanowisk badawczych.

Teza pracy

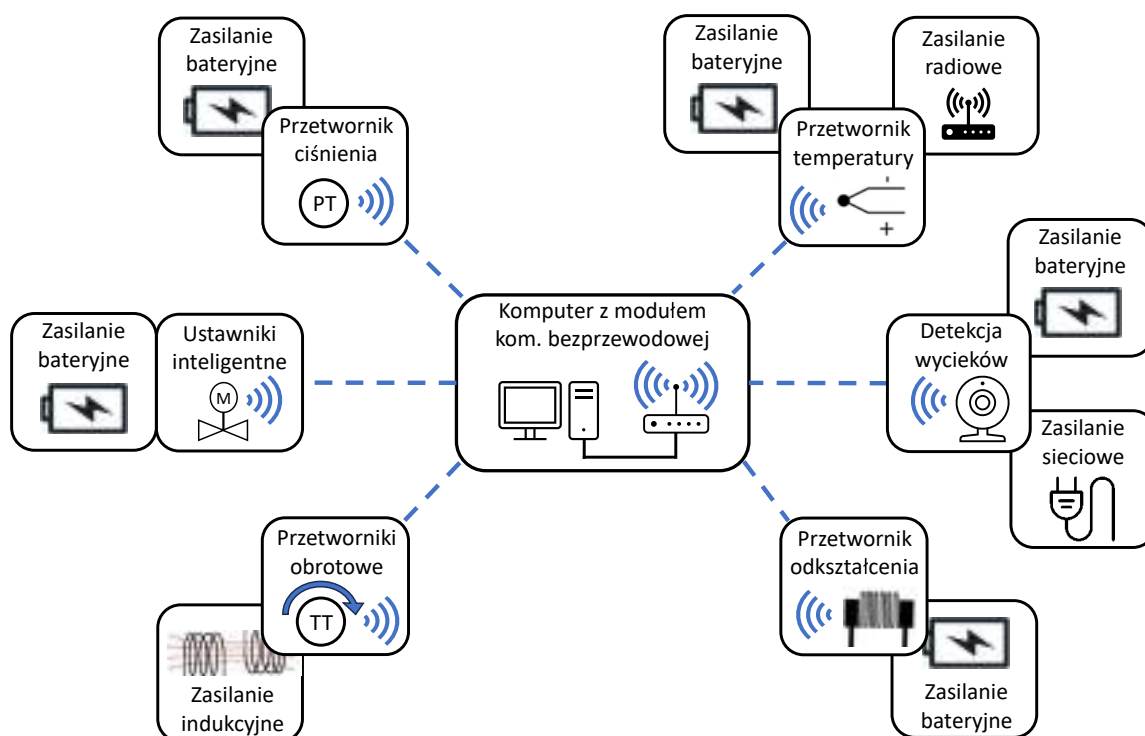
Możliwe jest usprawnienie procesu przygotowywania badań komponentów lotniczych i uzyskanie nowych możliwości badawczych poprzez wprowadzenie w laboratoriach bezprzewodowych inteligentnych przetworników i układów pomiarowych projektowanych z uwzględnieniem wymagań technicznych i specyfiki badań komponentów lotniczych. Nowe podejście do projektowania tych przetworników ukierunkowane na wydłużenie czasu pracy przy zasilaniu bateryjnym, zwiększenie możliwości zasilania bezprzewodowego oraz opracowanie dedykowanych metod sterowania ustawnikami pozycyjnymi i metod detekcji wycieków pozwala zbudować konfigurowalny system Internetu Rzeczy o parametrach niedostępnych w obecnie stosowanych rozwiązaniach.

Koncepcja pracy

Prace udokumentowane w rozprawie doktorskiej mają udowodnić powyżej postawioną tezę na drodze analizy aktualnego stanu wiedzy w obszarze nowoczesnej elektroniki i czujników inteligentnych oraz prac konstrukcyjno-badawczych, które będą prowadziły do wdrożenia nowych rozwiązań w lotniczych laboratoriach badawczych. Na podstawie przedstawionej charakterystyki badań infrastruktury stanowisk badawczych i struktury systemów pomiarowych w laboratoriach lotniczych, została zaproponowana koncepcja rozwoju laboratoriów opierająca się na czterech filarach:

- wprowadzenie inteligentnych bezprzewodowych przetworników o niskim zużyciu energii, współpracujących ze standardowymi czujnikami stosowanymi w laboratoriach lotniczych;
- wprowadzenie inteligentnych bezprzewodowych wysokoobrotowych przetworników pomiarowych;
- wprowadzenie inteligentnych bezprzewodowych ustawników pozycyjnych o niskim zużyciu energii współpracujących z zaworami regulacyjnymi;
- wprowadzenie inteligentnych bezprzewodowych układów wykrywających wycieki.

Urządzenia reprezentujące każdą z czterech grup rozwiązań będą mogły pracować w strukturze sieci, komunikując się z punktem centralnym udostępniającym dane pomiarowe głównemu systemowi pomiarowemu laboratorium. Punkt centralny sieci pozwoli również na przesyłanie wartości zadanych do elementów wykonawczych, które na tej podstawie będą wykonywać ruch. Główne założenia systemu zostały przedstawione na rysunku 1.6. Dzięki zastosowaniu ogólnie dostępnego standardu komunikacji zaproponowane urządzenia będą mogły również pracować niezależnie, komunikując się z urządzeniami takimi jak komputer przenośny lub telefon.



Rysunek 1.6. Koncepcja wdrożenia inteligentnych rozwiązań pomiarowych i wykonawczych

1.3 Układ pracy

Praca składa się z pięciu rozdziałów, ułożonych w sposób odpowiadający kolejnym etapom badań i prac projektowych. Rozdziały I-III mają charakter wprowadzający i przeglądowy, a rozdział IV projektowo-badawczy. Rozdział V to podsumowanie efektów pracy doktorskiej.

Rozdział I to wprowadzenie w tematykę testów wykonywanych w laboratoriach lotniczych oraz uzasadnienie potrzeby wdrożenia w tym obszarze inteligentnych przetworników dedykowanych IoT. Zostaje tutaj przedstawiona teza, pytanie badawcze, cel oraz zakres pracy.

Rozdział II to wprowadzenie w tematykę obszarów wytypowanych jako te, w których wdrożenie inteligentnych rozwiązań Internetu Rzeczy może przynieść największe efekty, z punktu widzenia laboratoriów testujących komponenty lotnicze. Zostają omówione kierunki badawcze i aktualnie dostępne na rynku systemy.

Rozdział III zawiera przegląd wiedzy z zakresu inteligentnych czujników i układów pomiarowych, przeprowadzony w celu wytypowania rozwiązań spełniających wymagania laboratoriów lotniczych, pod kątem wykorzystania w obszarach wskazanych w poprzednim rozdziale. Zostaje przedstawiona podstawowa charakterystyka i struktura przetworników inteligentnych, metody zasilania i metody komunikacji. Rozdział kończy analiza metod mogących posłużyć do budowy inteligentnego układu monitorowania pracy stanowiska na podstawie analizy obrazu.

Rozdział IV przedstawia prace projektowo-badawcze, dotyczące budowy inteligentnych przetworników dedykowanych pracy w laboratorium lotniczym:

- **Podrozdział 4.1** zajmuje się bezprzewodowymi inteligentnymi przetwornikami pomiarowymi o zasilaniu radiowo-bateryjnym.
- **Podrozdział 4.2** przedstawia efekty prac nad projektem wysokoobrotowego wielokanałowego przetwornika temperatury o zasilaniu indukcyjnym.
- **Podrozdział 4.3** opisuje efekty prac nad projektem bezprzewodowego sterownika ustawnika pozycyjnego, mogącego pracować z precyzyjnymi zaworami regulacyjnymi stosowanymi podczas testów komponentów lotniczych.
- **Podrozdział 4.4** obejmuje prace badawcze dotyczące budowy inteligentnego układu detekcji wycieków na stanowiskach badawczych.
- **Podrozdział 4.5** przedstawia przykładowy sposób integracji zaproponowanych rozwiązań z systemem kontrolno-pomiarowym.

Rozdział V stanowi podsumowanie wszystkich wykonanych prac. Uzyskane efekty badań zostają tutaj zestawione z tezą oraz pytaniem badawczym, sformułowanymi na początku rozważań w rozdziale pierwszym. W rozdziale omówiono również obszary potencjalnych dalszych badań i prac wdrożeniowych.

Rozdział 2

Potencjalne obszary wdrożenia inteligentnych rozwiązań kontrolno-pomiarowych w laboratoriach lotniczych

Przegląd potrzeb laboratoriów testujących komponenty lotnicze pozwolił na wytypowanie grup, w których wdrożenie inteligentnych czujników i układów pomiarowych dedykowanych Internetowi Rzeczy, może przynieść największe korzyści. Tak jak przedstawiono we wstępie pracy są to: bezprzewodowe przetworniki pomiarowe, ustawniki pozycyjne oraz systemy monitorowania stanowisk badawczych. Żeby zaproponować innowacyjne rozwiązania, konieczne było przeanalizowanie aktualnie stosowanych metod i możliwości w każdej z wytypowanych grup. W punktach 2.1-2.3 zostały porównane wybrane rozwiązania aktualnie dostępne na rynku. Przeprowadzono również badania literaturowe mające na celu zapoznanie się z kierunkami rozwoju w wytypowanych obszarach. Jednak pomimo dużego znaczenia badań komponentów lotniczych trudno odszukać publikacje naukowe dotyczące wdrożenia inteligentnych rozwiązań Internetu Rzeczy w obszarze laboratoriach komponentów lotniczych, co było dodatkową motywacją do kontynuacji badań.

2.1 Przetworniki pomiarowe

Jak wspomniano we wstępie pracy, w laboratoriach lotniczych dominuje podejście do pomiarów polegające na przesyłaniu zmierzonych wartości w postaci sygnałów napięciowych lub prądowych, do wielokanałowych kart pomiarowych obsługujących np. termopary, tensometry, czujniki ciśnienia i przepływu o wyjściu analogowym. Znacznie rzadziej są wykorzystywane czujniki mające cechy czujników inteligentnych, posiadające możliwość komunikacji poprzez sieć przewodową lub bezprzewodową. Występują jednak obszary gdzie wykorzystanie czujników mających cechy czujników inteligentnych jest bardziej powszechne, jednak również w tych obszarach wykorzystywane są zazwyczaj ich podstawowe funkcje. Przykładem stosowania czujników inteligentnych w laboratoriach lotniczych mogą być różnego rodzaju przepływomierze inteligentne (rys. 2.1a). Już sam pomiar przepływu, w wielu przypadkach wymaga wykonania kondycjonowania sygnału i przetwarzania danych. Przepływomierze inteligentne mają również zazwyczaj możliwość zmiany parametrów z poziomu wyświetlacza lub poprzez połączenie



(a) Przepływomierz firmy E+H



(b) Czujnik ciśnienia firmy Autrol

Rysunek 2.1. Przetworniki, które mogą zostać zaklasyfikowane jako inteligentne

sieciowe. Na podobnej zasadzie można wskazać przykłady wykorzystania inteligentnych czujników ciśnienia (rys. 2.1b) i innych, które mogą być rozpatrywane jako przetworniki inteligentne ze względu na możliwość komunikacji sieciowej lub zdolność przetwarzania zmierzonych danych, zgodnie z definicjami przedstawionymi dalej w rozdziale 3.1. Są to jednak urządzenia przystosowane do zasilania przewodowego i ukierunkowane głównie na korzystanie z przewodowych protokołów komunikacji. Komunikacja bezprzewodowa nie występuje lub pełni rolę dodatkowej metody przesyłania danych i konfiguracji. Kolejnym przykładem mogą być niektóre moduły telemetryczne posiadające cechy bezprzewodowych przetworników inteligentnych. Szczególnie istotnym obszarem gdzie wykorzystanie telemetry jest czasami jedyną metodą wykonania pomiaru są testy komponentów obrotowych. Systemy telemetryczne stosowane w lotniczych laboratoriach badawczych wykorzystują zazwyczaj sposób transmisji radiowej opracowany przez producentów i nie są kompatybilne z innymi systemami. W większości przypadków nadajnik pracuje z przypisanym do niego odbiornikiem, który przesyła dalej wartości pomiarów poprzez protokół sieci przewodowej, albo w postaci sygnału prądowego lub napięciowego do karty pomiarowej. Występują proste moduły o kilku kanałach pomiarowych i małych wymiarach, nie przekraczających kilku centymetrów (rys. 2.2) oraz moduły wielokanałowe o bardziej skomplikowanej budowie. Stosowane jest głównie



(a) Moduł firmy KMT



(b) Moduł firmy LORD

Rysunek 2.2. Moduły telemetryczne o niskiej liczbie kanałów pomiarowych

	KMT CTP-NT	Caemax Dx	LORD SG-Link	Datatel dt100
L. kanałów	8	6	2	4
Pasmo	24 kHz	1 kHz	1 kHz	10 kHz
Rozdzielczość	16 Bitów	16 Bitów	12 Bitów	24 Bity
Zasilanie	indukcyjne bateryjne	bateryjne, indukcyjne	bateryjne indukcyjne	bateryjne, indukcyjne
Komunikacja	indukcyjna radiowa	radiowa	radiowa	indukcyjna
Wymiary	60 x 40 x 10 mm	45 x 25 x 10 mm	41 x 29 x 6 mm	50 x 35 x 10 mm
Obsługiwane typy czujników	termopary, PT100, PT1000, tensometry, wej. napięciowe, cz. wibracji	termopary, tensometry, wej. napięciowe	tensometry, wyj. napięciowe, wej. licznikowe	termopary, tensometry, wej. napięciowe cz. wibracji
Zużycie energii	< 8 W	< 0,5 W	< 0,1 W	< 0,25 W

Tabela 2.1. Porównanie wybranych modułów telemetrycznych o małych rozmiarach

zasilanie bateryjne i indukcyjne, w zależności od wymagań aplikacji. Moduły telemetryczne mają zróżnicowane parametry (tab. 2.1), a większość z nich jest ukierunkowana na jak najwyższą możliwą do uzyskania częstotliwość pomiarową, z czego wynika wysokie zużycie energii. Część producentów oferuje połączenie modułów i przesyłanie danych przez jedno łącze transmisyjne, przy zapewnieniu nawet kilkuset kanałów pomiarowych. Takie moduły transmisyjne są również wykorzystywane do pomiarów na elementach obrotowych. Dostępne prędkości obrotowe są jednak wtedy ograniczone do niskich wartości rzędu kilku tysięcy obrotów/minutę, ze względu na trudności z wyważaniem układu i ograniczoną odporność modułów na siły odśrodkowe (rys. 2.3a). Stosowane są również moduły dedykowane zastosowaniu w badaniach komponentów wirujących (rys. 2.3b). Moduły telemetry



(a) Zestaw modułów telemetrycznych



(b) Telemetria w testach śmigieł

Rysunek 2.3. Moduły telemetryczne firmy KMT użyte w testach obrotowych

	KMT CTP NT Rotate	IR Telemetrics	TILKOM TT03
L. kanałów	8/16/32/64	8/32/128	23
Pasmo	do 0-22 kHz	6-150 kHz	120 Hz/2 kHz
Rozdzielność	16 Bitów	12-24 Bitów	12 Bitów
Zasilanie	bateryjne/indukcyjne 8.14 W dla NT8 z tensometrami, 6-7 godzin pracy przy zas. bater.	indukcyjne ≤ 30 W	indukcyjne ≤ 30 W
Komunikacja	radiowa	optyczna/ind.	indukcyjna
Maks. prędkość	3000 obr./min	20000 obr./min	20000 obr./min
Obsługiwane typy czujników	termopary, tensometry cz. rezystancyjne cz. wibracji, napięciowe	termopary, tensometry cz. rezystancyjne cz. wibracji, napięciowe	tensometry, cz. rezystancyjne

Tabela 2.2. Porównanie wybranych modułów do testów obrotowych

obrotowej charakteryzują się zazwyczaj znacznie bardziej solidną konstrukcją, ponieważ muszą przeciwstawić się siłom odśrodkowym, działającym na nie podczas wykonywania testów. Producenci oferują swoje rozwiązania w formie rodzin produktów o zmiennej modyfikowalnej liczbie kanałów pomiarowych i typie obsługiwanych czujników (tab. 2.2). W zakresie średnich prędkości obrotowych (zazwyczaj do 10 tys. obr./min) systemy telemetryczne mogą korzystać z wymiennych modułów pomiarowych (rys. 2.4a), dla wyższych prędkości odpowiadających prędkościom elementów obrotowych w silniku odrzutowym (nawet powyżej 20 tys. obr./min) potrzebna jest bardziej zwarta konstrukcja (rys. 2.4b).



(a) Telemetria o budowie modułowej



(b) Telemetria do wysokich prędkości obrotowych

Rysunek 2.4. Moduły telemetryczne w testach obrotowych

Alternatywą dla telemetrii obrotowej są złącza obrotowe wykorzystujące szczotki ślizgające się po pierścieniach, ale nie są one wystarczająco wytrzymałe dla testów długoterminowych. Przy prędkościach rzędu kilkudziesięciu tysięcy obr./min żywotność szczotek liczona w milionach obrotów, pozwala na wykonanie tylko kilkuset godzin testu przed regeneracją złącza obrotowego. Ponadto złącze obrotowe jest podatne na drgania mechaniczne, co może mieć

wpływ na rejestrowane pomiary. W większości przypadków koszt rozwiązań wielokanałowych jest jednak niższy niż dla rozwiązań telemetrycznych. Nie wszystkie moduły telemetryczne, a w szczególności te wykorzystywane na wczesnych etapach rozwoju elektroniki, mogą być zaklasyfikowane jako przetworniki inteligentne np. ze względu na to, że przetwarzają zmierzone sygnały na sygnał radiowy, bez wykorzystania układów logicznych w sposób analogowy. Telemetria oraz złącza obrotowe były wykorzystywane w testach lotniczych już dosyć wcześnie, ze względu na istotność danych, które można zarejestrować przy ich pomocy. Przykładowo, wykrycie przegrzewania się wirującej bieżni łożyska na etapie testów laboratoryjnych, może pozwolić na uniknięcie awarii podczas lotu samolotu. Testy porównawcze rozwiązań telemetrycznych i złącz obrotowych były przeprowadzane w firmie General Electric już w 1956 roku [24]. Na przestrzeni lat były również podejmowane udane próby wykorzystania protokołów bezprzewodowej transmisji danych w różnego rodzaju testach komponentów lotniczych. Do takich rozwiązań możemy zaliczyć wykorzystanie standardu WiFi w systemie telemetrycznym zasilanym bateryjnie, stosowanym na helikopterze [25], użycie standardu WiFi do bezprzewodowej kontroli obciążenia łopatki turbiny i pozyskiwanie w podobny sposób danych pomiarowych z wirującej turbiny gazowej [26]. Można również odnaleźć przykłady wdrożenia przetworników bezprzewodowych w testach wykonywanych podczas lotu. Przykładem takiego systemu jest system NIFTI (ang. *Non-Intrusive Flight Test Instrumentation*) [27], pozwalający na bezprzewodowy pomiar wibracji i odkształcenia elementów, do których został przyklejony przetwornik pomiarowy (rys. 2.5). Takie zastosowania znacznie ułatwiają wykonywanie testów



(a) Przetwornik systemu NIFTI



(b) Panel z interfejsem używanym wewnątrz samolotu

Rysunek 2.5. System telemetryczny do pomiarów wykonywanych podczas lotu

podczas lotu samolotu, ponieważ prowadzenie przewodów po powierzchni samolotu jest bardzo problematyczne. Czujniki inteligentne mogą być wykorzystywane nie tylko podczas badań komponentów prototypowych, ale również do monitorowania stanu statków powietrznych, podczas docelowej eksploatacji. Są prowadzone badania nad wprowadzeniem inteligentnych łożysk, wyposażonych w czujniki i zdolności komunikacyjne, do zastosowania w silnikach lotniczych [28, 29]. Rozwiązania IoT mają również coraz większe znaczenie w procesie organizacji i monitorowania produkcji w fabrykach wykonujących komponenty lotnicze, poprzez rozszerze-

nie możliwości stosowanych systemów MES (ang. *Manufacturing Execution System*) [30, 31]. Zarówno w procesach produkcyjnych jak i podczas eksploatacji wytworzonych komponentów, bezprzewodowe czujniki inteligentne pozwalają na gromadzenie danych mogących ułatwić predykcyjne zarządzanie utrzymaniem ruchu [32, 33]. Pomimo coraz szerszego stosowania bezprzewodowych czujników inteligentnych dedykowanych Internetowi Rzeczy w różnych obszarach związanych z lotnictwem, trend ten nie jest obserwowany w laboratoriach lotniczych. Szczególnie jeśli chodzi o wykorzystanie protokołów zapewniających obniżone zapotrzebowanie na energię takich jak Bluetooth, Zigbee, Thread itp. Obserwowany w ostatnich latach rozwój w obszarze obniżenia zużycia energii podczas komunikacji bezprzewodowej, otwiera szerokie spektrum możliwości w projektowaniu systemów telemetrycznych. Jak wskazano we wstępie pracy, badania przeprowadzane w laboratoriach lotniczych charakteryzują się dużą różnorodnością i zmianami w konfiguracji stanowisk pomiędzy kolejnymi kampaniami testowymi. Możemy wyróżnić bazową część instalacji laboratorium, która jest modyfikowana pomiędzy kolejnymi testami, oraz część zmienną zazwyczaj zlokalizowaną w okolicy stołu, na którym instalowane są komponenty testowe. Wprowadzenie przetworników inteligentnych współpracujących z czujnikami typowymi dla testów komponentów lotniczych może mieć znaczenie szczególnie w zmiennej części instalacji testowej. W tym obszarze wprowadzenie inteligentnych czujników i przetworników bezprzewodowych, projektowanych z uwzględnieniem specyfiki laboratoriów lotniczych może pozwolić na uzyskanie nowych możliwości badawczych, ułatwienie przygotowywania testów związane z rezygnacją z licznych przewodów, a nawet w niektórych przypadkach poprawę jakości uzyskiwanych pomiarów, ze względu na przetwarzanie sygnałów w pobliżu miejsca pomiaru. Znaczne korzyści może również przynieść wprowadzenie bezprzewodowych obrotowych modułów telemetrycznych o niskim koszcie wdrożenia. Na podstawie analizy wymagań testów komponentów lotniczych zostały zaplanowane dwa odrębne projekty przetworników inteligentnych przeznaczonych do obsługi czujników (rozdziały 4.1 i 4.2). W pierwszym projekcie zostaje zaprojektowany, wykonany i zbadany uniwersalny przetwornik bezprzewodowy, przeznaczony do pracy stacjonarnej lub wolnoobrotowej. Drugi projekt zajmuje się konstrukcją wielokanałowego przetwornika przeznaczonego do testów wysokoobrotowych. Projekty charakteryzują się odrębnym podejściem do zasilania i montażu układów, ze względu na zróżnicowane wymagania wynikające z charakteru pracy. Trudno jest porównywać bezpośrednio parametry projektowanych urządzeń do urządzeń dostępnych na rynku, ze względu na odmienne założenia projektowe. Dostępne moduły telemetryczne oferują wysokie częstotliwości pomiarowe przy wysokim zużyciu energii, co jest okupione krótkim czasem pracy przy zasilaniu baterijnym lub koniecznością stosowania wysokowydajnego zasilania bezprzewodowego. Podejście niskoenergetyczne do pomiarów wprowadza pewne ograniczenia takie jak zredukowanie częstotliwości pomiarowych, jednak otwiera nowe spektrum możliwości przedstawione w rozdziałach projektowych.

2.2 Ustawniki pozycyjne

Jednym z głównych celów pracy jest wykorzystanie nowych możliwości, wynikających z wykorzystania inteligentnych bezprzewodowych czujników i układów pomiarowych dedykowanych IoT w obszarze laboratoriów testujących komponenty lotnicze. Wprowadzenie przetworników inteligentnych dedykowanych współpracy z czujnikami typowymi dla testów lotniczych, nie przyniesie pełnego efektu, bez wprowadzenia inteligentnych sterowanych bezprzewodowo, zasilanych bateryjnie układów wykonawczych. Zawory wraz z ustawnikami zmieniają położenie w pomieszczeniu testowym, tak samo jak pozostałe elementy układów pomiarowych przygotowywanych na potrzeby poszczególnych testów. Z tego względu badania zostały rozszerzone o ten obszar. Główny podział to układy o napędzie pneumatycznym i elektrycznym [34]. Napędy pneumatyczne oferują z reguły wyższą prędkość ruchu suwaka pozycjonera. W przypadku napędów pneumatycznych zmiana pomiędzy skrajnymi pozycjami zajmuje tylko kilka sekund, a dla napędów elektrycznych może to już być nawet kilkanaście sekund do ponad minuty, w zależności od wielkości zaworu i sposobu sterowania. Zwyczajowo przyjmuje się, że dokładność pozycjonowania ustawników pneumatycznych jest niższa niż tych z napędami elektrycznymi, jednak najnowsze konstrukcje mają już coraz wyższe dokładności pozycjonowania. Różnice wynikają w dużej mierze ze sposobu obsługi położenia stabilizacji. Ustawnik z napędem elektrycznym może wyłączyć napęd i zatrzymać się w docelowej pozycji, a ustawnik o napędzie pneumatycznym przez cały czas musi regulować ciśnienie oddziałujące na membranę zapewniającą ruch. Przy stałej zadanej wartości pozycji, ustawniki o napędzie pneumatycznym doregulowują się, żeby skompensować stratę ciśnienia, co może być widoczne w postaci wahań na wynikach pomiarów. Precyzyjne kontrolowanie pozycji wymaga bardzo dokładnej regulacji ciśnienia w komorach siłownika pneumatycznego [35, 36]. Napędy pneumatyczne są ponadto podatne na wahania ciśnienia w instalacji powietrza technicznego oraz wibracje na stanowisku pracy, co może utrudniać wykonanie najbardziej precyzyjnych badań w ustabilizowanych warunkach. W przypadku nastawników o napędzie elektrycznym dokładność pozycjonowania uzyskuje się poprzez stosowanie przekładni zamieniającej ruch obrotowy na ruch posuwisty, łatwiej jest zatem uzyskać odpowiednią rozdzielczość pozycjonowania i stabilizację po osiągnięciu położenia zadanego. Ze względu na konieczność dostarczania sprężonego powietrza uniemożliwiającą pracę bezprzewodową, brak konieczności szybkiej zmiany ustawienia zaworu, brak możliwości wyłączenia napędu po osiągnięciu położenia zadanego oraz trudniejsze uzyskanie wysokiej rozdzielczości regulacji, do zastosowania w projektach zostały wytypowane ustawniki o napędzie elektrycznym. W celu zgłębienia tematyki ustawników pozycyjnych o napędzie elektrycznym, przeprowadzono analizę parametrów rozwiązań dostępnych na rynku. W Laboratorium Badania Łożysk w Sieci Badawczej Łukasiewicz - Instytucie Lotnictwa, od ponad 10 lat wykorzystuje się różnego rodzaju ustawniki pozycyjne, wybrane poprzez porównanie pozycji dostępnych na rynku oraz komunikację z dostawcami. Każdy z używanych ustawników odpowiada

wymaganiom przeprowadzonych testów, w związku z czym dobrze reprezentują one wymagania badań i możliwości sprzętowe dostępnych rozwiązań. Parametry wybranych ustawników przedstawionych na rysunku 2.6 zostały zestawione w tabeli 2.3. Właściwości związane z poborem prądu i dokładnością sterowania zostały zmierzone w laboratorium, ponieważ nie były w pełni dostępne w notach katalogowych.



Rysunek 2.6. Przykładowe ustawniki pozycyjne

	Badger Meter	Badger Meter	Ari	Ari	Auma
Model	HH-500	SEVA-100	FR2.2	Premio-2G	Profox
Napięcie zas.	24 VDC	24 VDC	230 VAC	24 VDC	24 VDC
Zawór	1/2 cala	1/2 cala	4 cale	1 cal	2 cale
Typ napędu	DC komutat.	krokowy	AC 1 faz.	DC bezszczotk.	krokowy
Rozdzielczość	1 %	1 %	1 %	0,25 %	0,25 %
Prąd czuwania:	82 mA	90 mA	66 mA	140 mA	120 mA
Prąd ruchu:	380 mA	550 mA	130 mA	350 mA	600 mA
Sterowanie	4-20 mA, 0-10 V	4-20 mA 0-10 V 0-5 V	4-20mA, 0-10 V	4-20 mA, 0-10 V, Modbus, Profibus, Fieldbus, Bluetooth	4-20 mA, 0-10 V, Modbus, Profibus, Profinet, Bluetooth

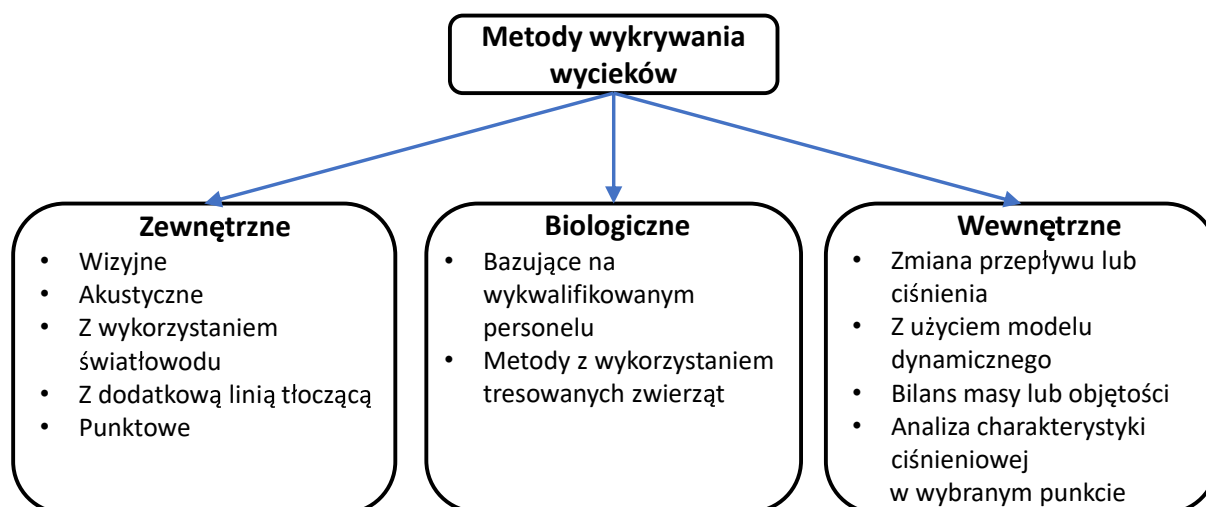
Tabela 2.3. Porównanie wybranych ustawników z napędami elektrycznymi

Ustawniki elektryczne są dostępne z bardzo zróżnicowaną gamą napędów np. szczotkowe i bezszczotkowe napędy prądu stałego, jednofazowe i trójfazowe napędy zasilane prądem przemiennym oraz silniki krokowe. W mniejszych ustawnikach elektrycznych, które będą rozpatrywane w pracy są stosowane głównie napędy prądu stałego i silniki krokowe. Ustawniki stosowane w laboratoriach lotniczych zazwyczaj są projektowane do ogólnych celów przemysłowych, z czego wynikają ich duże rozmiary i brak rozwiązań redukujących zużycie energii. W wielu przypadkach nie zapewniają one również pożądanej w testach dokładności regulacji. Zazwyczaj oferują rozdzielczość kontroli położenia nie większą niż 0,25 %

pełnego otwarcia zaworu i to z pominięciem położenia bliskich skrajnym pozycjom zaworu. Dla zastosowań przemysłowych jest to wystarczające, jednak dla testów lotniczych bywa to zbyt mała rozdzielczość. Z powyższego przeglądu wiedzy jasno wynika zatem konieczność ukierunkowania prac badawczych na możliwość uzyskania jak najwyższej rozdzielczości pozycjonowania i stabilności po osiągnięciu położenia zadanego. Niestandardowym wymaganiem dla regulacji stawianym względem ustawników w badaniach lotniczych jest praca od wartości odpowiadających rozszczelnieniu zaworów poniżej 1 % stopnia otwarcia zaworu. Przykładowo dla badań łożysk silników lotniczych wykonywane są testy, w których zmniejsza się wydatek oleju z kilku litrów na minutę, odpowiadających normalnej pracy silnika, do wartości równych setnym częściom litra na minutę, w celu określenia limitów pracy i charakterystyki temperaturowej. Występują sytuacje, w których układy regulacji ustawników są modyfikowane w celu poprawy dokładności lub wymagania testów są redukowane ze względu na ograniczone możliwości. Niezależnie od zastosowanego napędu ustawniki pozycyjne mają coraz częściej cechy układów inteligentnych [37–39], jednak komunikacja bezprzewodowa jest zazwyczaj wykorzystywana tylko do konfiguracji układu i diagnostyki. Znacznie częściej występuje wykorzystanie komunikacji przewodowej w postaci sygnałów z zakresu 0-10 V, 4-20 mA lub poprzez protokół przewodowej komunikacji sieciowej. Inteligentne ustawniki mają w wielu przypadkach funkcje pozwalające na diagnostykę napędu, co zostało wprowadzone po raz pierwszy w roku 1994 przez firmę Fisher Controls [40]. Na rynku nie występują obecnie ustawniki o zasilaniu bateryjnym dedykowane obsłudze bezprzewodowej, będące jednym z tematów prac badawczych w rozprawie doktorskiej. Jeśli chodzi o układy regulacji położenia stosowane w ustawnikach pozycyjnych to wykorzystują one często proste regulatory wyróżniające trzy stany pracy: otwieranie, zamykanie i postój. Prędkość ruchu jest ustawiana za pomocą przełączników lub za pomocą dedykowanej aplikacji sterującej. Układy takie mają również definiowalną strefę nieczułości wokół położenia zadanego żeby zredukować oscylacje. Rzadziej występują układy z regulacją PID. Obie metody regulacji nie są ukierunkowane na oszczędzanie energii, ale na jak najszybsze osiągnięcie wartości zadanej położenia przy możliwie wysokiej dokładności pozycjonowania. Ustawniki są często elementem układu regulacji kaskadowej. Zewnętrzna pętla regulacji odpowiada wtedy za ustawienie właściwej wartości przepływu, ciśnienia, temperatury lub innej regulowanej wielkości. Dalsze analizy i prace projektowe będą przeprowadzone dla ustawników z silnikami prądu stałego. Tego rodzaju napędy są szeroko stosowane w ustawnikach pozycyjnych i mogą być w łatwy sposób sterowane. Jednym z celów jest jednak opracowanie metody, która może zostać w łatwy sposób zaadaptowana w ustawnikach z różnymi rodzajami napędów elektrycznych. Co ciekawe analizowane dostępne ustawniki pozycyjne z silnikami komutatorowymi oferują mniej dokładne metody regulacji niż serwonapędy z silnikami prądu stałego do zastosowań ogólnych np. stosowania w robotach i obrabiarkach.

2.3 Systemy detekcji wycieków

Monitorowanie wycieków na stanowiskach badawczych testujących komponenty lotnicze nie jest prostym zadaniem ze względu na znaczne zróżnicowanie prowadzonych kampanii testowych. Automatyczne monitorowanie charakterystycznych parametrów takich jak poziom, przepływ lub ciśnienie oleju, nie zawsze zapewnia wystarczający poziom bezpieczeństwa. W wielu przypadkach podczas badań zespoły laboratoriów pracują w trybie trzymianowym, tylko ze względu na brak wystarczających zabezpieczeń. Stanowiska testowe mają swoje systemy monitorujące, jednak zazwyczaj ograniczają się one do alarmów od przekroczeń górnych i dolnych, co w wielu przypadkach nie jest wystarczające. Przykładowo wyciek oleju niezmieniający w większym stopniu przepływu podawanego na obiekt testowy nie wyłączy stanowiska, ale może zafałszować wynik badań. Przy testowaniu komponentów prototypowych, często występujących tylko w jednym egzemplarzu, uszkodzenie lub niewłaściwy pomiar może przynieść wysokie straty finansowe i przyczynić się do opóźnienia wdrożenia testowanych technologii. W literaturze nie znaleziono informacji o próbach wdrożenia systemów detekcji wycieków na lotniczych stanowiskach badawczych. Większość odszukanych przykładów dotyczy instalacji przemysłowych, a w szczególności monitorowania rurociągów, zgodnie z podziałem przedstawionym na rysunku 2.7. W literaturze wydziela się trzy grupy metod wykrywania

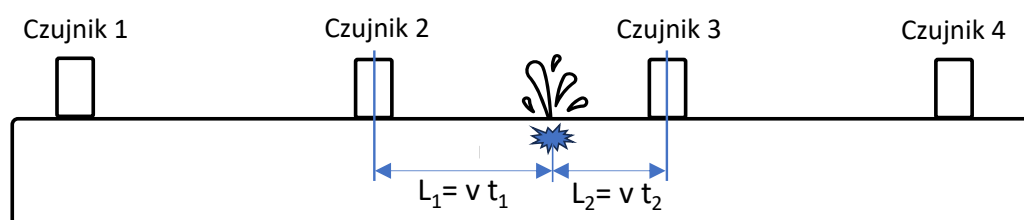


Rysunek 2.7. Metody wykrywania wycieków

wycieków [41–45]. Metody biologiczne (ang. *biological methods*) uwzględniające wykorzystanie wykwalifikowanej obsługi lub szkolonych do tego celu zwierząt, metody bazujące na wykorzystaniu systemów kontroli i pomiarów już obsługujących instalację (ang. *internal methods, software based methods*) oraz zewnętrzne systemy używane niezależnie od pomiarów już wykonywanych w monitorowanej instalacji (ang. *hardware methods, external methods*). Prace dotyczą budowy inteligentnego bezprzewodowego układu detekcji wycieków, który może zostać w łatwy sposób dodany do już istniejących stanowisk badawczych. Dalszy przegląd jest zatem ukierunkowany na zewnętrzne systemy monitorujące.

Metody akustyczne

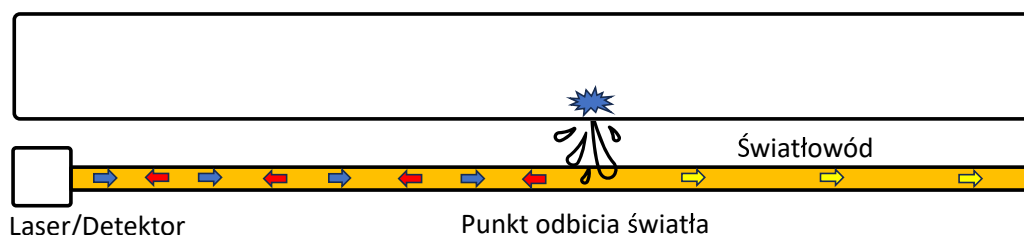
Wykrywanie nieszczelności z wykorzystaniem emisji akustycznej jest możliwe ponieważ przepływ gazu lub cieczy przez pęknięcie lub dziurę w rurociągu generuje sygnał akustyczny (rys. 2.8). Wzdłuż instalacji instalowane są czujniki dźwięku wykrywające generowany sygnał [46, 47]. Im czujnik znajduje się bliżej miejsca wycieku, tym amplituda sygnału jest większa, co pozwala na lokalizację usterki. Lokalizacja może zostać wykonana również poprzez metodę korelacji sygnałów odbieranych przez dwa czujniki, przy znajomości prędkości dźwięku w medium transportowanym rurą. Sygnał jest podatny na różnego rodzaju zakłócenia pochodzące z otoczenia instalacji. Do redukcji powstałych zakłóceń wykorzystuje się różnego rodzaju metody przetwarzania sygnału, co zwiększa dokładność lokalizacji wycieku. Metoda nie nadaje się do lokalizacji małych wycieków, które nie generują wystarczająco głośnego dźwięku i zazwyczaj wymaga dużej liczby czujników wzdłuż instalacji.



Rysunek 2.8. Akustyczny system detekcji wycieków

Wykorzystanie światłowodów

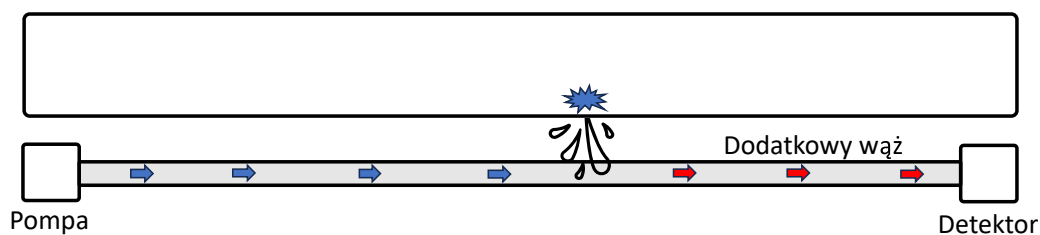
Gdy ważne jest zredukowanie liczby czujników, możliwe jest wykorzystanie metody ze światłowodem poprowadzonym wzdłuż instalacji (rys. 2.9). Mierzone substancje wchodzi w kontakt ze światłowodem w przypadku wystąpienia nieszczelności, co powoduje zmianę temperatury światłowodu i zmianę sposobu odbicia wiązki lasera [48, 49]. Lokalizacja jest obliczana z wykorzystaniem pomiaru opóźnienia czasowego pomiędzy wyemitowaniem impulsu laserowego, a wykryciem odbicia. Metoda może być używana tylko wtedy, gdy substancja w instalacji ma inną temperaturę niż temperatura otoczenia.



Rysunek 2.9. System detekcji wycieków z wykorzystaniem światłowodu

Wykorzystanie dodatkowej linii tłoczącej

Kolejną metodą pozwalającą na wykrywanie wycieków wzdłuż instalacji jest zastosowanie dodatkowych węży półprzepuszczalnych wzdłuż instalacji (rys. 2.10). Po jednej ze stron węża znajduje się pompka tłocząca gaz pomocniczy, a po drugiej stronie detektor [50]. Podczas wycieku gaz lub płyn z monitorowanej instalacji wnika do węża pomiarowego, którym następnie trafia do detektora. Metoda daje wysoką czułość wykrywania wycieków.



Rysunek 2.10. Wykrywanie wycieku z wykorzystaniem dodatkowej linii

Wykrywanie wycieków w miejscu instalacji czujnika

Oprócz powyżej omówionych metod pozwalających na wykrywanie wycieków na dłuższym odcinku instalacji występują również różnego rodzaju czujniki pozwalające na wykrycie wycieku w miejscu zainstalowania czujnika (2.11). Do tej grupy możemy zaliczyć czujniki działające na zasadzie przewodzenia elektrycznego (nie mogą być stosowane do olejów), czujniki działające na zasadzie monitorowania koloru podłoża, czujniki wykrywające gaz, czujniki pływakowe (tylko do znacznych wycieków, umieszczane w zbiornikach). Pomimo, że czujniki tego rodzaju potwierdzają tylko wystąpienie medium w położeniu bliskim miejscu instalacji czujnika, zazwyczaj można na tej podstawie wnioskować o wystąpieniu wycieku w danym obszarze.



(a) Czujnik optyczny



(b) Czujnik pływakowy

Rysunek 2.11. Wykrywanie wycieku w wybranym punkcie

Metody wizyjne

W ostatnim czasie coraz szerzej stosuje się metody wykrywania wycieków bazujące na komputerowej analizie obrazu [51, 52]. Główną zaletą tych metod jest to, że pozwalają na wykrycie wycieku na dosyć szerokim obszarze, nie tylko w bezpośredniej bliskości orurowania. Wiele z systemów wykorzystuje metody sztucznej inteligencji do sklasyfikowania wystąpienia wycieku, jednak jest to możliwe już przy wykorzystaniu podstawowych metod analizy obrazu. Algorytmy wykorzystujące metody sztucznej inteligencji zyskują przewagę w sytuacjach, w których w zarejestrowanym obrazie jest widoczne wiele innych zmian niż występujący wyciek. Odpowiednie wytrenowanie sieci neuronowej, pozwala na sklasyfikowanie wyodrębnionej zmiany. W stałych scenach, szczególnie w miejscach bez dostępu osób, proste metody analizy obrazu mogą być wystarczające i nie wymagają one trenowania algorytmu przed rozpoczęciem użytkowania. Na rynku występują już systemy pozwalające na detekcję wycieków w obiektach przemysłowych (rys. 2.12), często bazujące również na analizie obrazu termowizyjnego. Równolegle są jednak nadal prowadzone badania nad udoskonaleniem metod lub dopasowaniem cech systemów do konkretnych aplikacji [53–55].



(a) System IntelliView



(b) System Visionify

Rysunek 2.12. Systemy detekcji wycieków bazujące na widzeniu komputerowym

Z punktu widzenia laboratoriów lotniczych spośród wszystkich wyżej wymienionych metod szczególnie ciekawe wydaje się zastosowanie metod związanych z analizą obrazu. Szersze wprowadzenie inteligentnych układów pomiarowych posiadających funkcjonalności analizy obrazu daje perspektywę poprawy efektywności monitorowania stanowisk badawczych. Problemy związane z detekcją wycieków nie są w pełni rozwiązywane przy wykorzystaniu klasycznych układów pomiarowych. Moc obliczeniowa potrzebna do komputerowej analizy obrazu wykracza jednak poza możliwości typowych mikrokontrolerów, z czego wynika potrzeba zastosowania komputera o wyższych parametrach. W podrozdziale 3.7 został wykonany przegląd wiedzy z zakresu widzenia komputerowego, dający podstawy teoretyczne do budowy inteligentnego układu detekcji wycieków na stanowiskach badawczych opisywanego w rozdziale 4.4.

Rozdział 3

Inteligentne czujniki i układy pomiarowe

Przed szerszym zdefiniowaniem pojęcia czujnika inteligentnego, dobrze jest wrócić do podstawowych pojęć metrologicznych takich jak czujnik oraz przetwornik, w celu dalszego wykazania różnic w stosunku do ich odpowiedników w wersjach inteligentnych. Według słownika metrologicznego udostępnianego przez GUM (Główny Urząd Miar) [56] termin czujnik, może być używany zamiennie z terminem sensor oraz w niektórych dziedzinach detektor. Można go używać w stosunku do „elementów przyrządu pomiarowego lub łańcucha pomiarowego, na który oddziałuje bezpośrednio wartość mierzona”. Przetwornik jest natomiast definiowany jako „urządzenie pomiarowe przetwarzające, zgodnie z określonym prawem, wielkość wejściową na wielkość wyjściową”. Pojęcie czujnika mieści się zatem w definicji przetwornika pomiarowego. Jednak nie każdy przetwornik jest czujnikiem pomiarowym. Przykładowo, może on tylko współpracować z czujnikami pomiarowymi i przetwarzać wielkości odbierane z czujników. Z punktu widzenia dalszych rozważań i prac badawczych, istotne są również pojęcia przyrządu pomiarowego, będącego urządzeniem pozwalającym na wykonanie pomiaru oraz układu pomiarowego, będącego kompletnym zbiorem przyrządów pomiarowych i innych urządzeń, zestawionych w celu wykonywania pomiarów np. elementów zasilających i wykonawczych. Według tego samego słownika układ pomiarowy skonfigurowany na stałe może być nazywany stanowiskiem pomiarowym, powszechnie wykorzystywanym w laboratoriach badawczych. Termin „smart sensor” zaczął być używany od początku lat osiemdziesiątych [57], do określenia urządzeń posiadających dodatkowe możliwości w stosunku do podstawowej funkcjonalności pomiarowej. Od tamtego czasu określanie urządzeń mianem inteligentnych, stało się bardzo popularne i często nadużywane w różnego rodzaju materiałach reklamowych, co często prowadziło do niedokładnej interpretacji i zniekształcenia sposobu rozumienia tego pojęcia przez użytkowników. W wyniku czego, określenie urządzenia jako inteligentne, jest dla wielu osób równoznaczne z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji, co jest możliwe i wielu przypadkach stosowane, ale według dostępnych definicji nie jest warunkiem koniecznym takiego zakwalifikowania urządzenia. Definicja czujnika inteligentnego ewoluowała na przestrzeni lat

wraz z rozwojem techniki. Obecnie przyjmuje się, że poprawne jest nazywanie inteligentnymi urządzeń spełniających przynajmniej jedno z poniższych kryteriów [58]:

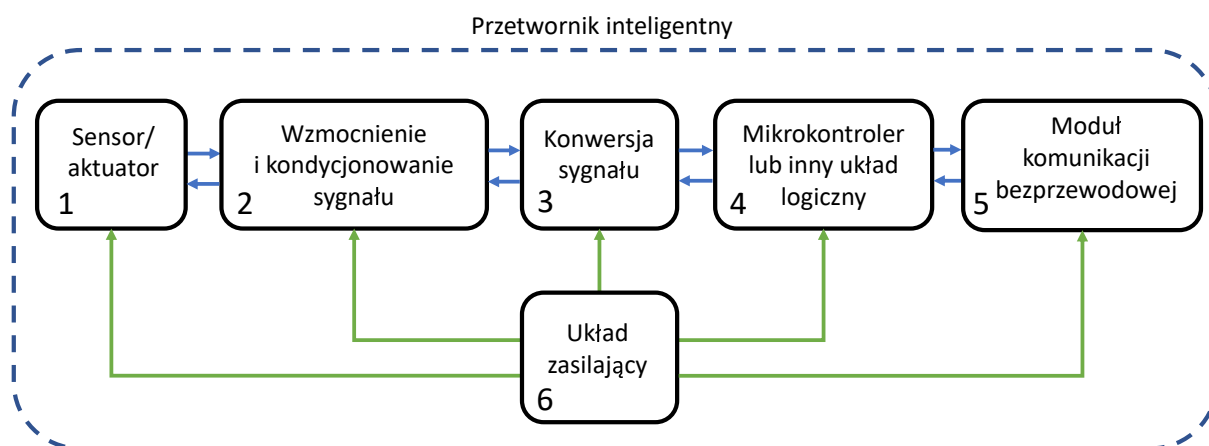
- komunikowanie się z wykorzystaniem protokołów komunikacyjnych,
- przetwarzanie i analizowanie danych pomiarowych,
- detekcja błędów i autodiagnostyka,
- samodzielne podejmowanie decyzji np. zmiana zakresu pomiarowego,
- zdolność samouczenia np. budowa modelu procesu poprzez sieci neuronowe.

W serii norm IEEE 1451 [59, 60] przygotowanych przez organizację Institute of Electrical and Electronic Engineers, pojęcie czujnika inteligentnego wyprowadza się, korzystając z szerszego pojęcia jakim jest przetwornik inteligentny (ang. *smart transducer*). Według standardu przetwornik inteligentny, to taki, który zapewnia funkcje wykraczające poza te niezbędne do generowania prawidłowej reprezentacji mierzonej lub kontrolowanej wielkości. Norma wspomina również, że dodatkowe funkcjonalności zazwyczaj ułatwiają aplikację w środowisku sieciowym. Przetwornikiem inteligentnym może być czujnik lub aktuator, posiadający powyżej przedstawione właściwości. Inteligentny przetwornik w postaci aktuatora, przyjmuje standaryzowane polecenia i na ich podstawie realizuje zadania, mając możliwość lokalnej weryfikacji swojego działania i zapewnienia informacji zwrotnej. W przypadku czujnika inteligentnego, analogowy sygnał jest zamieniany na postać cyfrową, przetwarzany i transmitowany poprzez standaryzowany przewodowy lub bezprzewodowy protokół komunikacyjny. Idąc dalej, łatwo można zdefiniować inteligentne układy pomiarowe jako układy wykorzystujące inteligentne przetworniki i inteligentne przyrządy pomiarowe również oferujące szereg dodatkowych opcji przetwarzania danych i komunikacji. Do głównych korzyści wynikających ze stosowania przetworników inteligentnych można zaliczyć to, że przetwarzają one dane w sposób rozproszony [61, 62], odciążając centralny komputer systemu pomiarowego powiązany z gromadzeniem danych i wizualizacją pomiarów dostępną dla użytkownika. Lokalne przetwarzanie danych i wykorzystanie protokołów komunikacyjnych jest również sposobem na znaczne zredukowanie liczby przewodów, których koszt w niektórych projektach może być dominujący. Pod tym względem szczególnie korzystne jest wykorzystanie czujników dedykowanych pracy w bezprzewodowych sieciach sensorowych (ang. *Wireless Sensor Network*), pozwalające na niemal zupełne wyeliminowanie przewodów w układach pomiarowych [63, 64]. Stosowanie przetworników bezprzewodowo transmitujących dane zapewnia również dużą mobilność i niezależność od położenia, co jest kluczem do szerokiego stosowania w przemyśle, logistyce, transporcie, systemach inteligentnych budynków i wielu innych obszarach gospodarki. Występują proste przetworniki inteligentne ograniczające się do podstawowych funkcji komunikacyjnych i przetwarzania danych oraz urządzenia o znacznym stopniu skomplikowania, wykorzystujące zaawansowane algorytmy obliczeniowe, w tym również związane z metodami sztucznej inteligencji oraz technikami przetwarzania dźwięku i obrazu. W szerokim stosowaniu sieci czujników bezprzewodowych oraz Internetu Rzeczy bazującym na rozwiązaniach inteligentnych, jest widziana podstawa

kolejnej transformacji przemysłowej nazywana Gospodarką 4.0, w odniesieniu do czwartej rewolucji przemysłowej [4]. Bazą zmian jest nowe podejście do zarządzania informacjami udostępnianymi przez Internet Rzeczy, będący siecią inteligentnych urządzeń [8]. Prace nad rozwojem bezprzewodowych czujników i układów pomiarowych wpisują się zatem, w aktualne kierunki badawcze w Polsce i na świecie [11]. Ich stosowanie wprowadza jednak również pewne ograniczenia, które powinny zostać każdorazowo przeanalizowane przed wdrożeniem w nowych obszarach. Szczególnie ważne jest skupienie się na aspektach związanych z zasilaniem układów oraz na problemach związanych z bezprzewodowym przesyłaniem danych pomiarowych. W kolejnych podrozdziałach zostanie przeanalizowana struktura przetworników inteligentnych, protokoły transmisji bezprzewodowej, topologie sieci, komponenty elektroniczne, sposoby zasilania, metody przetwarzania danych pod kątem wykorzystania przetworników inteligentnych w laboratoriach lotniczych. W dalszej części pracy, informacje te posłużą do skonstruowania przetworników inteligentnych, pozwalających na rozszerzenie możliwości lotniczych laboratoriów badawczych. Zgodnie z tematem pracy, przegląd wiedzy obejmuje głównie tematykę inteligentnych czujników i układów pomiarowych komunikujących się bezprzewodowo, nie obejmuje zatem rozwiązań dedykowanych pracy z magistralami przewodowymi typu Modbus, Profibus, Fieldbus, HART itp., które również są szeroko stosowane w komunikacji z czujnikami inteligentnymi [65]. Protokoły komunikacji przewodowej, zostaną omówione tylko w kontekście komunikacji mikrokontrolerów z przetwornikami analogowo-cyfrowymi i innymi komponentami elektronicznymi oraz komunikacji bramy danych z głównym systemem kontrolno-pomiarowym.

3.1 Struktura bezprzewodowych przetworników inteligentnych

Do podstawowych elementów tworzących strukturę inteligentnego, komunikującego się bezprzewodowo przetwornika pomiarowego (rys. 3.1) możemy zaliczyć: sensor będący w interakcji z mierzonym procesem i na tej podstawie generujący sygnał lub aktuator wpływający na proces (1), układ kondycjonowania sygnału lub wzmacniacz sygnału (2), układ konwersji sygnału (3) (najczęściej przetwornik analogowo-cyfrowy lub cyfrowo-analogowy) oraz mikrokontroler (4) (najczęściej przetwornik analogowo-cyfrowy lub cyfrowo-analogowy) oraz mikrokontroler



Rysunek 3.1. Struktura inteligentnego przetwornika

lub inny układ logiczny (4), pozwalający na realizację dodatkowych funkcji (w stosunku do klasycznych czujników pomiarowych i wykonawczych), komunikujący się poprzez moduł komunikacji bezprzewodowej (5) z pozostałymi elementami systemu kontrolno-pomiarowego [57, 66]. Do realizacji komunikacji często wykorzystuje się moduły komunikacyjne, które często są zintegrowane z mikrokontrolerem w jednym module. Ważną rolę pełni również część urządzenia odpowiedzialna za zasilanie (6) mikrokontrolera i pozostałych komponentów urządzenia [67]. Od sposobu zasilania układu, często zależy metoda aplikacji i ogólne możliwości systemu pomiarowego. Z tego względu rozwinęły się układy zarządzania, które zwiększają efektywność zasilania i mają możliwość przełączania pomiędzy różnymi źródłami. Zgodnie z definicją, urządzenie pełniące funkcję inteligentnego przetwornika pomiarowego, może nie posiadać w swojej strukturze sensora i być przeznaczone do pracy z różnego rodzaju czujnikami zewnętrznymi. Taka sytuacja może mieć miejsce w laboratorium badawczym, gdzie chcemy wyposażyć klasyczne sensory (np. termopary, tensometry), w dodatkowe możliwości czujników inteligentnych. W wielu przypadkach funkcjonalności kilku wyszczególnionych bloków są realizowane przez jeden zintegrowany komponent elektroniczny, co pozwala na uproszczenia pracy konstruktora i minimalizację wymiarów finalnego urządzenia. Sytuacja upraszcza się szczególnie w sytuacji gdy skorzystamy z czujnika z wyjściem cyfrowym, podłączonym do wejść mikrokontrolera. Bloki odpowiadające sensorowi, kondycjonowaniu i konwersji sygnału są wtedy realizowane za pomocą jednego układu elektronicznego.

3.2 Mikrokontrolery, moduły komunikacyjne i komputery jednopłytkowe

Elementem, który wyróżnia czujniki inteligentne spośród czujników zintegrowanych, które mają w swojej strukturze elementy przetwarzające sygnał, jest użycie mikrokontrolera lub innego układu logicznego np. FPGA (ang. *field-programmable gate array*), pozwalającego na rozszerzenie możliwości układu [68]. W ostatnich latach nastąpił znaczący rozwój w obszarze mikrokontrolerów, a w szczególności w obszarze układów SoC (ang. *System on Chip*) ze zintegrowaną obsługą komunikacji radiowej np. nRF52840 [69]. Tego typu układy wymagają zazwyczaj tylko podłączenia kilku elementów w celu umożliwienia komunikacji. Na rynku jest obecnie wiele modułów komunikacyjnych (rys. 3.2), zbudowanych w oparciu o układy SoC. W wielu przypadkach są one zintegrowane z anteną. Wszystkie elementy potrzebne do komu-



(a) WE Proteus III (nRF52840)



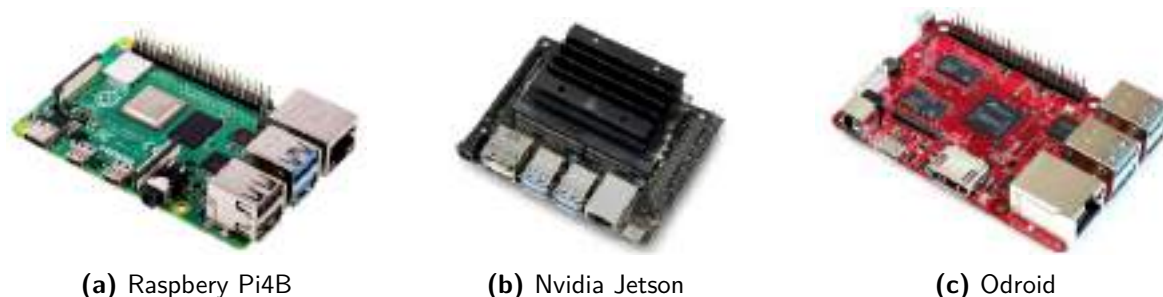
(b) Microchip ATBTLC1000



(c) Espressif ESP32-WROOM-32

Rysunek 3.2. Popularne moduły komunikacyjne zintegrowane z mikrokontrolerem.

nikacji, są wtedy dostępne w postaci jednego modułu o małych wymiarach, który ułatwia konstrukcję urządzeń komunikujących się bezprzewodowo, w tym czujników inteligentnych. Moduł komunikacyjny może pełnić rolę głównego elementu zarządzającego pracą całego urządzenia, albo komunikować się z głównym mikrokontrolerem poprzez protokół przewodowy (najczęściej UART i SPI) i odpowiadać tylko za komunikację. W ostatnim dziesięcioleciu obserwowany był również dynamiczny rozwój komputerów jednopłytkowych (rys. 3.3). W szczególności



Rysunek 3.3. Popularne komputery jednopłytkowe

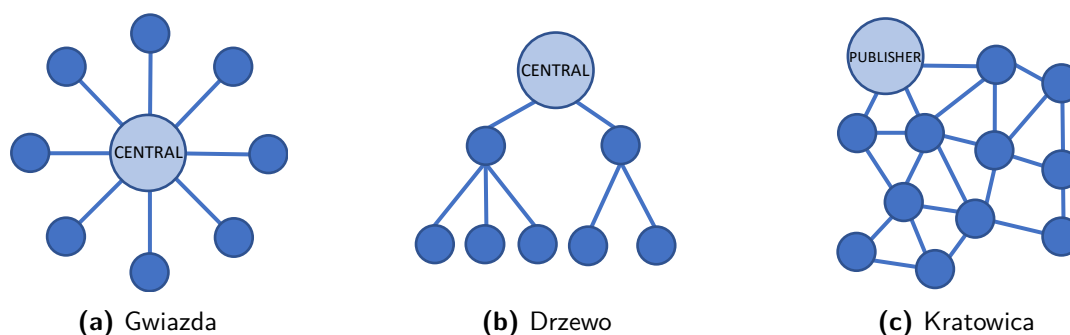
należy wyróżnić rodzinę komputerów Raspberry Pi, która miała duży wpływ na popularyzację stosowania inteligentnych układów pomiarowych i rozwiązań IoT, zarówno przez studentów, jak i konstruktorów profesjonalnych urządzeń [70]. Dzięki wysokiej mocy obliczeniowej, komputery Raspberry Pi pozwalają stosować skomplikowane algorytmy przetwarzania dźwięku i obrazu, co jest znacznie utrudnione w przypadku stosowania mikrokontrolerów (tab. 3.1). Do użycia w przygotowywanych projektach przetworników bezprzewodowych współpracujących z typowymi czujnikami (rozdział 4.1 i 4.2) oraz projekcie sterownika ustawnika pozycyjnego (rozdział 4.3), został wytypowany układ nRF52840, ze względu na swoje możliwości sprzętowe przy bardzo niskim zużyciu energii oraz szeroką dokumentację udostępnianą przez producenta. W projekcie dotyczącym wykrywania wycieków (rozdział 4.4) przy pomocy metod widzenia maszynowego został zastosowany komputer Raspberry Pi 4 model B.

	Proteus III - nRF52840	Raspberry Pi 4 model B
Mikroprocesor	Cortex-M4 64 MHz	Quad-Core Cortex-A72 1,5 GHz
Pamięć	256 KB RAM, 1 MB Flash	2-8 GB RAM, gniazdo kart pamięci
Komunikacja bezprzew.	BLE 5.4/Low Energy, Bluetooth mesh, ANT, 802.15.4, Thread, Zigbee	BLE 5/Low Energy, WiFi
Interfejsy	UART, SPI, TWI, PDM, I2S, QSPI, NFC-A, USB 2.0	UART, SPI, I2C, GPIO, USB 2.0, USB 3.0, Ethernet, 2 x microHDMI, CSI i DSI
ADC	12-bit ADC	Brak (możliwość dodania płytki rozszerzeń)
System	Zephyr, Mbed lub bez systemu	Linux Raspbian, Windows 10 IoT
Zasilanie	1.7 V do 5.5 V	5,0 V (wymagany zasilacz 3 A)
Zużycie energii	Bardzo niskie. Dla komunikacji BLE z 1Hz około 10uA przy 3V nap. zas.	Stosunkowo wysokie. Zazwyczaj powyżej 1A, zależnie od wykorzystanych peryferiów.
Wymiary	12 x 8 x 2 mm	85 x 56 x 17 mm

Tabela 3.1. Porównanie parametrów modułu Proteus III (nRF52840) i Raspberry Pi 4B

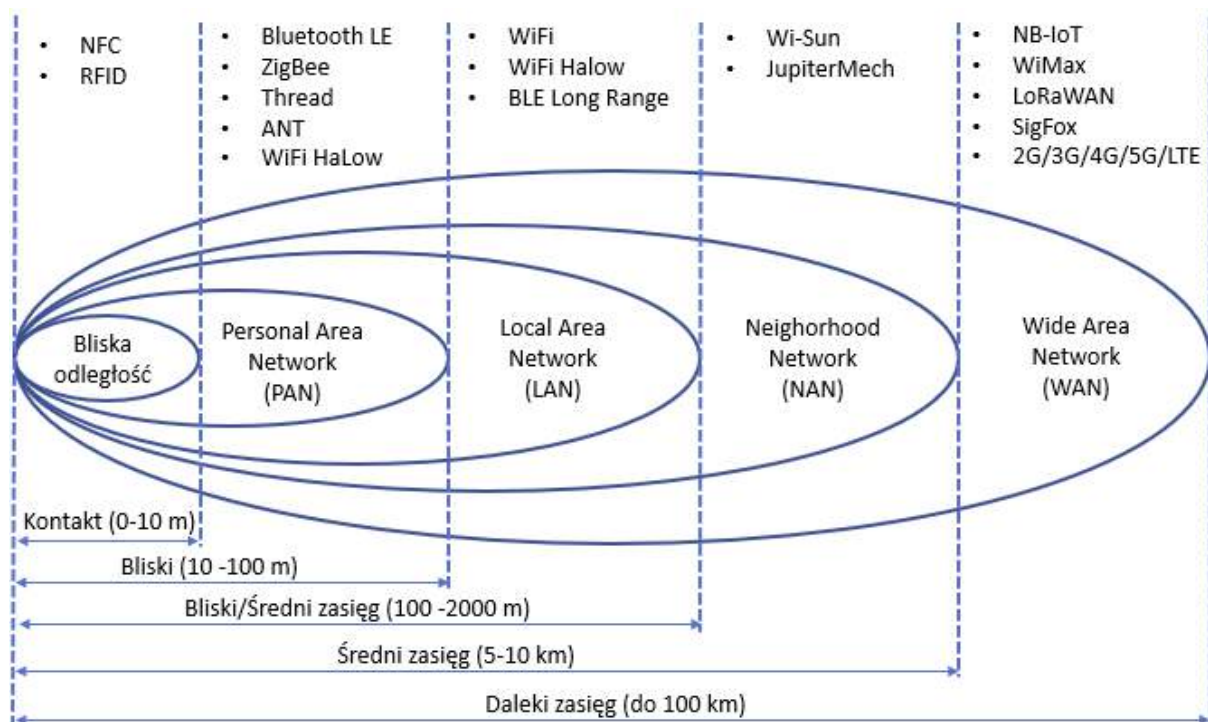
3.3 Bezprzewodowe sieci czujnikowe

Rozwój Internetu Rzeczy, jest silnie uzależniony od osiągnięć w obszarze komunikacji urządzeń zorganizowanych w bezprzewodowe sieci czujników (ang. *WSN - Wireless Sensor Network*) [71]. Podstawowym elementem każdej sieci czujników, jest węzeł wyposażony w mikrokontroler lub inny układ logiczny oraz element pomiarowy monitorujący przebieg procesu lub zmiennosc zjawisk np. temperatury, ciśnienia, ruchu, obecności itp. [72]. Pierwsze zastosowania bezprzewodowych sieci czujników były związane z zastosowaniami militarnymi, obecnie wkraczają one w coraz nowe obszary techniki, a w szczególności w te związane z monitorowaniem produkcji, medycyną, logistyką i transportem. Początkowo występowało zainteresowanie głównie rozwojem sieci przewodowych. Za rozpoczęcie prac nad przewodowymi sieciami czujnikowymi zbliżonymi do obecnych, przyjmuje się prace w ramach programu rozproszonych sieci czujników (ang. *distributed sensor network*), realizowanego przez agencję DARPA (ang. *Defense Advanced Research Projects Agency*), gdzie do komunikacji wykorzystywana była wtedy wczesna wersja internetu (około 1980 r.) [73]. Rozwój sieci czujników nabrał rozpędu w latach 90-tych XX wieku. Przełomowym momentem było opublikowanie przez międzynarodową organizację zrzeszającą elektryków i elektroników o nazwie IEEE (ang. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) w 1999 roku normy IEEE 1451.1, która proponowała sposób funkcjonowania czujnika inteligentnego w sieci. Stopniowo rozwijały się również sieci czujników bezprzewodowych, czego efektem było opublikowanie w 2003 roku normy IEEE 802.15.4 dającej podstawy funkcjonowania protokołów używanych również obecnie (Zigbee, WirelessHART, 6LoWPAN, Thread) oraz IEEE 1451.5 w 2007 roku (inteligentne przetworniki bezprzewodowe). Jednym z najistotniejszych parametrów, opisującym bezprzewodową sieć czujników, jest zastosowana topologia sieci. Podstawowe typy to sieci czujnikowe (rys. 3.4) zorganizowane w strukturze gwiazdy (ang. *star*), drzewa (ang. *tree*) oraz kratownicy (ang. *mesh*) [74]. W bardziej rozbudowanych sieciach, duże znaczenie ma przyjęty



Rysunek 3.4. Podstawowe topologie sieci bezprzewodowych

mechanizm trasowania, będący metodologią przesyłania pakietów pomiędzy węzłami. Wybrana metoda trasowania może zostać ukierunkowana na wybranie jednego z zakładanych celów np. wydłużenie czasu pracy przy zasilaniu bateryjnym, zwiększenie prędkości przesyłania pakietów danych lub niezawodności. Z punktu widzenia lotniczych laboratoriów badawczych,



Rysunek 3.5. Zestawienie rodzajów i standardów komunikacji bezprzewodowej

najbardziej interesująca jest praca w zakresie do 100 m, ze względu na ograniczony obszar pomieszczeń testowych, zatem w zakresie działania sieci PAN oraz w niektórych przypadkach w zakresie protokołów komunikacji na małych odległościach (rys. 3.5). Do najbardziej popularnych standardów dedykowanych do komunikacji w sieciach PAN można zaliczyć Bluetooth Low Energy, Zigbee i Thread [75, 76]. Ciekawe parametry oferuje również nowy protokół WiFi HaLow (tab. 3.2) [77]. Dla urządzeń znajdujących się w małej odległości wymieniających nieduże ilości danych popularne jest stosowanie NFC i RFID. Do zastosowania w przygotowywanych projektach inteligentnych bezprzewodowych czujników został wybrany Bluetooth Low Energy ze względu na niskie zużycie energii, wysoką odporność na zakłócenia

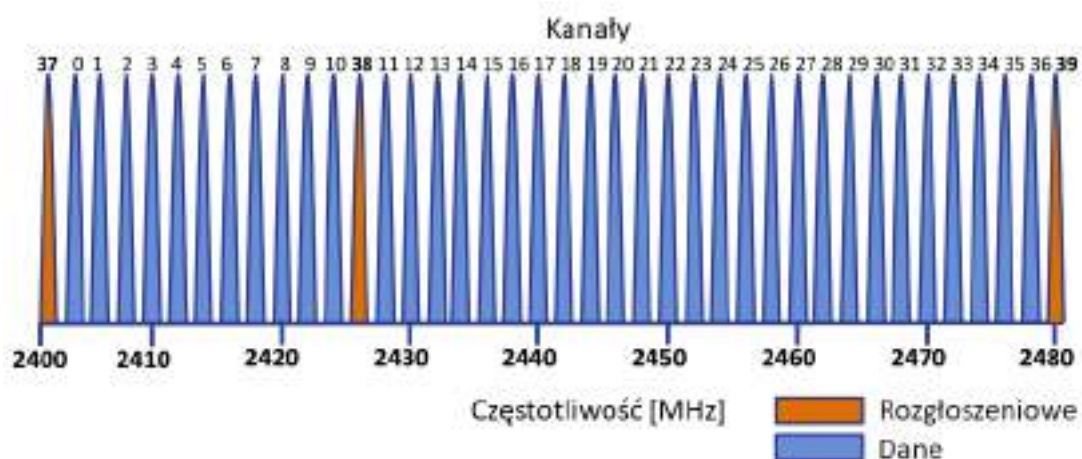
	Bluetooth LE	ZigBee	Thread	WiFi HaLow
Wprowadzenie	2010	2003	2015	2017
Pasma	2.4 GHz	868/915/2400 MHz	2.4 GHz	900 MHz
Przepustowość	2 Mbit/s	250 kbit/s	250 kbit/s	78 Mbit/s przy bliskiej odległości
Zasięg	100 m	100 m	100 m	1 km
Obsługa TCP/IP	Nie	Nie	Tak	Tak
Dostępne topologie sieci	gwiazda, drzewo, (kratowa w BLE MESH)	gwiazda, drzewo, kratowa	gwiazda, drzewo, kratowa	gwiazda

Tabela 3.2. Porównanie wybranych protokołów komunikacji bezprzewodowej

i kompatybilność z wieloma urządzeniami dostępnymi na rynku, w tym komputerami z modułami BLE i nowoczesnymi telefonami. Prędkość transmisji oferowana przez ZigBee oraz Thread, mogłaby okazać się zbyt niska w przypadku rozwoju projektów. WiFi HaLow oferuje interesujące parametry, ale w czasie przygotowywania projektu na rynek wchodziły dopiero moduły komunikacyjne dedykowane temu standardowi.

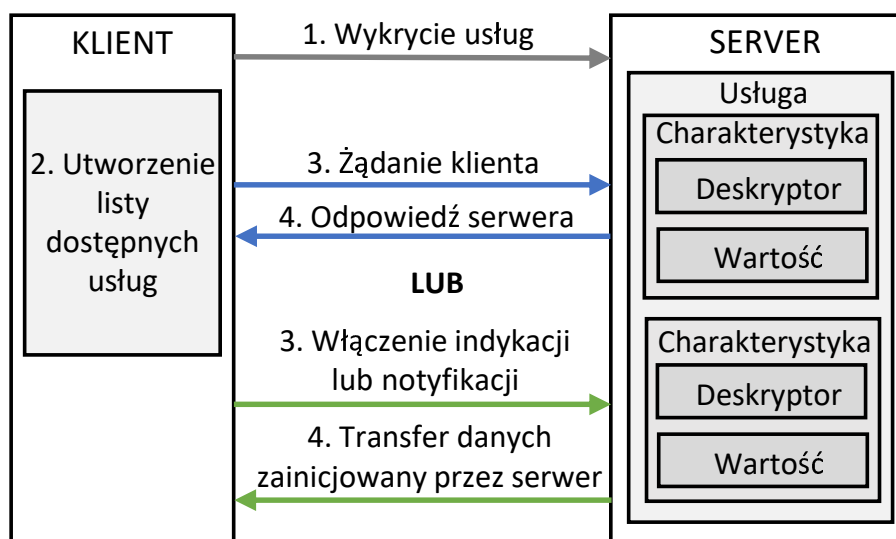
Bluetooth Low Energy

Bluetooth, w wersji BLE (ang. *Bluetooth Low Energy*) o obniżonym zapotrzebowaniu na energię, jest obecnie jednym z najpopularniejszych protokołów, służących do komunikacji z urządzeniami mobilnymi [78, 79]. BLE przeznaczony jest do pracy ze zmniejszonym poborem mocy w porównaniu do Bluetooth w wersji klasycznej bez pomniejszania zasięgu komunikacji. BLE i klasyczna wersja Bluetooth nie są kompatybilne, ale mogą być obsługiwane przez to samo urządzenie. Oba standardy wykorzystują to samo pasmo częstotliwości, ale BLE wykorzystuje inną technologię modulacji i zmniejszoną liczbę kanałów. Istnieje 40 kanałów o szerokości 2 MHz zamiast 79 kanałów o szerokości 1 MHz, które są używane w standardowej wersji Bluetooth (rys. 3.6). Trzy z nich służą do przesyłania pakietów rozgłoszeniowych, reszta jest wykorzystywana do ogólnych celów transmisji. BLE ogranicza ryzyko kolizji z innymi sieciami, poprzez technikę zwaną adaptacyjnym przeskakiwaniem częstotliwości (ang. *adaptive frequency hopping*). Zestaw kanałów używanych do komunikacji, jest okresowo



Rysunek 3.6. Kanały częstotliwości używane podczas komunikacji w standardzie BLE

zmieniany w celu zminimalizowania prawdopodobieństwa zablokowania transmisji. Adaptacyjna forma algorytmu oznacza, że numery kanałów, na których komunikacja może przebiegać w sposób optymalny, są zapisywane w formie listy. Jest ona na bieżąco aktualizowana przez komunikujące się urządzenia, dzięki czemu urządzenia mogą się komunikować tylko na wybranych optymalnych kanałach. Ta funkcjonalność jest bardzo interesująca z punktu widzenia laboratoriów lotniczych, ponieważ laboratoria znajdują się często w zasięgu sieci



Rysunek 3.7. Komunikacja w standardzie BLE

Wi-Fi oraz innych potencjalnych źródeł zakłóceń transmisji. Komunikacja dwukierunkowa w standardzie BLE rozpoczyna się między urządzeniem peryferyjnym (ang. *peripheral*), a urządzeniem centralnym (ang. *central*). Urządzenie peryferyjne wysyła pakiety rozgłoszeniowe i czeka na odpowiedź urządzenia centralnego w postaci prośby o połączenie. Tylko urządzenie centralne może inicjować połączenie. Kiedy połączenie jest ustanowione, urządzenia otrzymują nowe role klienta i serwera (rys. 3.7). Klient jest urządzeniem wysyłającym zapytania o dane do serwera, który może zaakceptować żądanie i przesłać dane w odpowiedzi. Dane na serwerze są uporządkowane według charakterystyk (ang. *characteristics*), reprezentujących wartość danych i usług, które są zbiorem powiązanych danych. Serwer może samodzielnie przysyłać dane w formie notyfikacji lub indykacji (ang. *notification, indication*), gdy wartość pojawi się w bazie danych, ale najpierw klient musi zażądać tych funkcjonalności. Notyfikacje nie wymagają potwierdzenia zwrotnego, tak jak ma to miejsce przy stosowaniu indykacji. Jednym z głównych usprawnień w stosunku do starszej wersji Bluetooth jest nowy sposób przypisania urządzeń (ang. *bonding*), który umożliwia szybkie i proste ponowne podłączenie urządzeń. W pamięci urządzeń przechowywane są informacje z procesu parowania, więc nie musi on być powtarzany przy każdym ponownym uruchomieniu. Zazwyczaj urządzenia komunikujące się w standardzie BLE spędzają najwięcej czasu w stanie oszczędzania energii, po czym są aktywowane w celu wykonania i przesłania pomiarów. Podobnie jak w innych standardach, najwyższy pobór prądu występuje podczas transmisji danych. BLE nie korzysta z protokołu TCP/IP, przez co do połączenia z Internetem wymaga wykorzystania urządzenia pełniącego funkcję bramy np. komputera, telefonu. BLE pozwala na komunikację typu P2P (ang. *point to point*) oraz w sieci o strukturze drzewa i gwiazdy [80]. Występuje również rozszerzenie pozwalające na obsługę struktury sieci kratowej [74], ale wymaga ono odrębnego podejścia i innego oprogramowania układowego.

3.4 Metody zasilania

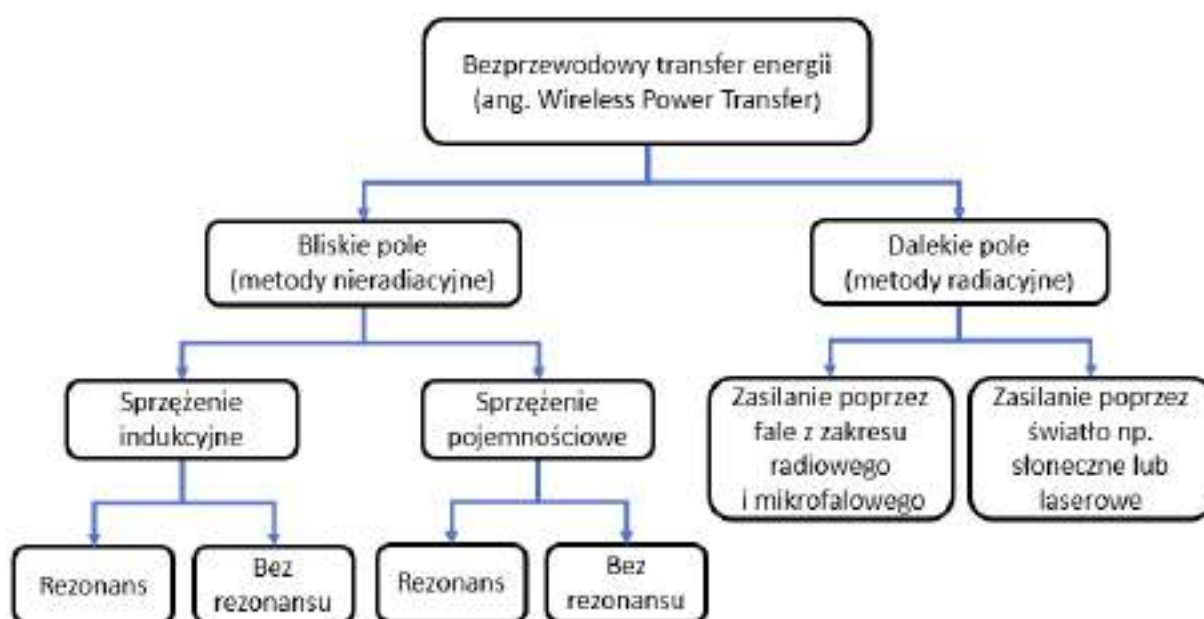
Najprostszym sposobem zasilenia czujnika inteligentnego komunikującego się bezprzewodowo, jest zasilanie z sieci elektrycznej poprzez zasilacz, co jednak w większości przypadków znacząco ogranicza mobilność i redukuje korzyści wynikające z komunikacji bezprzewodowej. Takie rozwiązanie wykorzystuje się zazwyczaj do zasilenia urządzeń pełniących rolę bramy danych lub nie zmieniających swojego położenia przez dłuższy czas. W znacznej liczbie przypadków stosuje się rozwiązania zwiększające swobodę w sposobie montażu przetworników pomiarowych takie jak: zasilanie bateryjne, bezprzewodowe lub zasilanie z odzyskiwaniem energii z otoczenia (rys. 3.8) [81].



Rysunek 3.8. Podział metod zasilania czujników

Wszystkie te rozwiązania mają jednak swoje ograniczenia, które w niektórych sytuacjach mogą wykluczyć zastosowanie komunikacji bezprzewodowej w połączeniu z konkretnym sposobem zasilania. Komunikacja bezprzewodowa o obniżonym zapotrzebowaniu na energię oferuje niższą przepustowość przesyłania danych w stosunku do rozwiązań z magistralą przewodową. Jest to po części związane ze sterowaniem pracą urządzenia ukierunkowanym na ograniczenie zużycia energii przy komunikacji bezprzewodowej. W większości bezprzewodowych protokołów komunikacyjnych, ograniczenie zużycia energii polega na cyklicznym wybudzaniu urządzenia, w celu wykonania pomiarów i przesłania danych, ze stanu głębokiego uśpienia, w którym zużycie energii jest bardzo niskie [82]. Średnie zużycie energii jest zatem zależne od częstotliwości wybudzania układu, a zatem i częstotliwości wykonywania pomiarów. Przykładowo, dla pomiarów związanych z monitorowaniem temperatury w pomieszczeniach, wymagana częstotliwość pomiarowa będzie znacznie niższa, niż dla pomiarów wykorzystywanych do kontroli temperatury łożysk wysokoobrotowych. Podczas doboru metody zasilania ważne jest również uwzględnienie parametrów takich jak wymagany zasięg zasilania, dostępność do przetwornika, wymagany czas pracy bez ingerencji użytkownika oraz możliwość zastosowania na obiektach ruchomych i obracających się. W wielu przypadkach wystarczające będzie zasilanie bateryjne, ponieważ dla niskich częstotliwości pomiarowych i odpowiednim doborze komponentów, urządzenia takie mogą pracować przez miesiące, a czasami nawet lata, przy zasilaniu z baterii o małych rozmiarach. Tam, gdzie parametry oferowane przez zasilanie bateryjne nie będą wystarczające, można skorzystać z jednej dostępnych metod zasilania bezprzewodowego.

Techniki bezprzewodowego przesyłania energii miały swoje początki już w XIX wieku. Za prekursora tego typu technologii powszechnie uważa się Nikolę Teslę, który na przełomie XIX i XX wieku, z powodzeniem przeprowadzał eksperymenty z tego zakresu [83]. Jednak już z praw Faradaya, sformułowanych na podstawie eksperymentów przeprowadzonych w 1831 roku, bezpośrednio wynika możliwość bezprzewodowego transferu energii. W ostatnim dziesięcioleciu, obserwowany jest dynamiczny rozwój różnego rodzaju technik bezprzewodowego przesyłania energii, co jest efektem rosnącego zapotrzebowania na zasilanie bezprzewodowe w obszarze elektroniki użytkowej, zastosowaniach badawczych i przemysłowych oraz nieustających dążeń do elektryfikacji środków transportu [84]. Pod względem zasady i obszaru działania, możemy podzielić metody bezprzewodowego transferu energii na pracujące w obszarze bliskiego i dalekiego pola elektromagnetycznego (rys. 3.9). Do pierwszej grupy moż-



Rysunek 3.9. Metody bezprzewodowego transferu energii

na zaliczyć urządzenia wykorzystujące sprzężenie indukcyjne lub pojemnościowe, stosowane głównie do zasilania urządzeń w bliskiej odległości od źródła zasilania. Druga grupa obejmuje zasilanie z wykorzystaniem energii przenoszonej przez promieniowanie elektromagnetyczne, umożliwiające zasilanie urządzeń na znacznie większych odległościach np. poprzez światło lub fale radiowe [85–88]. Obserwując rozwój techniki na przestrzeni ostatnich dwudziestu lat można zauważyć wielokrotne zwiększenie możliwości poszczególnych komponentów urządzeń (np. procesorów), podczas gdy baterie i akumulatory zapewniające mobilność urządzeń, rozwinęły się w znacznie mniejszym stopniu. Z tego względu rozwój metod bezprzewodowego zasilania i ładowania urządzeń jest obecnie tak istotnym zadaniem. W kontekście przetworników dedykowanych zastosowaniu w laboratoriach testujących komponenty lotnicze, szczególnie interesujące wydaje się wykorzystanie zasilania indukcyjnego na krótkich zasięgach (do kilku centymetrów) oraz intencjonalnego (z nadajnikiem) zasilania radiowego

o dalszym zasięgu (do kilku metrów). Zmienność warunków testowych utrudnia wykorzystanie technik odzyskiwania energii z procesu np. poprzez różnicę temperatur. Ilość rozproszonego promieniowania elektromagnetycznego (np. związanego z transmisją telewizyjną) również nie jest wystarczająca dla sieci przetworników pomiarowych. Do zastosowania w projektowanych przetwornikach pracujących z czujnikami typowymi dla testów lotniczych, zostało wytypowane zasilanie bateryjne oraz zasilanie radiowe, ze względu na zapewniony zasięg. W wersji obrotowej modułu telemetrycznego, zastosowano zasilanie indukcyjne, ze względu na większe przenoszone moce i brak wymagań co do częstych zmian miejsca instalacji. W badaniach dotyczących monitorowania stanowisk przy pomocy komputera Raspberry Pi zastosowano zasilanie z sieci elektrycznej z opcjonalnym zasilaniem bateryjnym.

Zasilanie poprzez indukcję elektromagnetyczną

Prawo indukcji elektromagnetycznej opracowane przez Faradaya mówi o tym, że siła elektromotoryczna indukcji w zamkniętym obwodzie elektrycznym generowana na skutek zmian obejmowanego strumienia wektora indukcji magnetycznej, jest proporcjonalna do prędkości jego zmian [89]. Gdy mamy do czynienia ze zwojnicą siła elektromotoryczna zwiększa się proporcjonalnie do liczby zwojów (wzór 3.1).

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (3.1)$$

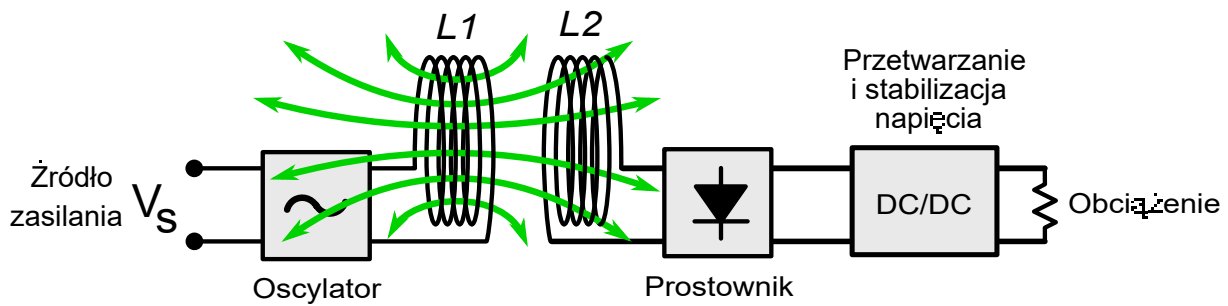
gdzie:

$\mathcal{E}$ - siła elektromotoryczna indukcji

Φ_B - strumień indukcji elektromagnetycznej

N - liczba zwojów

Ze wzoru 3.1 wynika, że w celu zwiększenia wartości zaindukowanego napięcia można wykonać dwie podstawowe czynności: zwiększyć liczbę zwojów przewodnika lub zwiększyć przyrost wartości strumienia pola w czasie. Zdolność obwodu do wytwarzania strumienia pola magnetycznego na skutek przepływu prądu elektrycznego nazywana jest indukcyjnością. Przekazywanie energii poprzez strumień magnetyczny i zjawisko indukcji elektromagnetycznej jest podstawą działania wielu systemów do bezprzewodowego transferu energii wykorzystywanych do zasilania elektroniki użytkowej, w zastosowaniach przemysłowych oraz transporcie. Zazwyczaj energia jest przekazywana pomiędzy dwoma cewkami, wykonanymi z drutu lub jako ścieżki płytki PCB. Cewka nadawcza jest zasilana zmiennym przebiegiem prądu, co generuje strumień magnetyczny przenikający poprzez obszar obejmowany przez cewkę odbiorczą, w której indukuje się napięcie (rys. 3.10) [90, 91]. Następnie poprzez układy elektroniczne po stronie odbiornika jest ono prostowane, stabilizowane i przetwarzane do poziomu odpowiedniego do zasilania urządzeń lub ładowania akumulatorów. Efektywność systemu przekazywania energii jest w dużej mierze zależna od indukcyjności cewki nadawczej,



Rysunek 3.10. Przesyłanie energii poprzez indukcję elektromagnetyczną

określającej jej zdolność do generacji strumienia pola magnetycznego oraz od indukcyjności cewki odbiorczej, od której jest zależny poziom indukowanego napięcia pod wpływem zmiennego strumienia indukcji magnetycznej. Znaczenie ma zatem liczba zwojów i geometria cewek wpływająca na indukcyjność. Ponadto istotny jest przebieg napięcia podawanego na cewkę nadawczą, przenikalność magnetyczna ośrodka, w którym przekazywana jest energia, oraz odległość i orientacja obwodów. Obwody, w których zmiany prądu w jednym obwodzie mają wpływ na napięcie indukowane w drugim obwodzie, nazywamy sprzężonymi indukcyjnie lub magnetycznie (ang. *inductive coupling, magnetic coupling*) [92]. Miarą stopnia sprzężenia indukcyjnego dwóch obwodów, będących pod wpływem generowanych przez siebie strumieni magnetycznych, jest indukcyjność wzajemna (wzór 3.2). Zależność pomiędzy indukcyjnością wzajemną, a poszczególnymi indukcyjnościami opisuje współczynnik sprzężenia [93]. Jego wartość zależy od geometrii układu i od przenikalności magnetycznej ośrodka, w którym pracuje układ. Im większy stopień sprzężenia układów, tym wyższa wartość indukowanego napięcia na cewce po stronie odbiorczej, na skutek zmian strumienia indukcji magnetycznej generowanego po stronie nadawczej (wzór 3.3).

$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \quad (3.2)$$

$$\mathcal{E}_1 = -M \frac{dI_2}{dt} \quad (3.3)$$

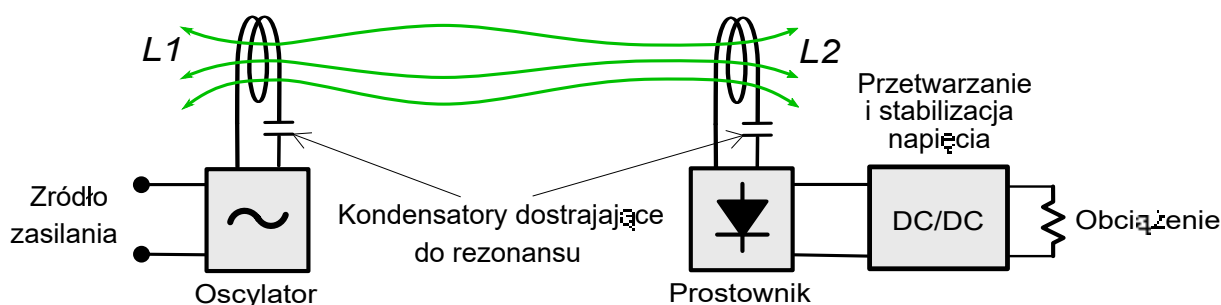
gdzie:

L_1 i L_2 - indukcyjności cewek, k - współczynnik sprzężenia,

I_2 - prąd w cewce nadawczej, M - indukcyjność wzajemna,

$\mathcal{E}_1$ - siła elektromotoryczna indukowana w cewce odbiorczej

Gdy istotne jest przekazywanie energii na większych odległościach, lub z większą wydajnością, lepszym rozwiązaniem jest wykorzystanie magnetycznego rezonansowego sprzężenia indukcyjnego (ang. *magnetic resonant inductive coupling*) [94–96]. Zjawisko to polega na zwiększeniu efektywności bezprzewodowego transferu energii na skutek doprowadzenia układu do rezonansu. Uzyskuje się to poprzez dostrojenie układu do częstotliwości własnej, uzupełniając układ o dodatkowe kondensatory (rys. 3.11).



Rysunek 3.11. Układ wykorzystujący magnetyczne sprzężenie rezonansowe

Projektując układ wykorzystujący zasilanie bezprzewodowe na drodze indukcyjnej, konstruktor może zaproponować swoje własne rozwiązanie lub skorzystać z jednego z dostępnych standardów. Najbardziej popularnym standardem wykorzystywanym do ładowania urządzeń mobilnych jest Qi, opracowany przez stowarzyszenie Wireless Power Consortium, skupiające firmy takie jak Samsung Electronics, Panasonic, Sony i wiele innych [97]. Standard Qi pozwala na transfer mocy do 30W, pozwalając jednocześnie na komunikację pomiędzy urządzeniami, której głównym celem jest optymalizacja przekazywania energii. Konkurencyjnym standardem jest AirFuel wspierany przez AiRFuel Alliance [98], który łączy zasilanie na drodze indukcyjnej z zasilaniem poprzez fale radiowe. Efektem tego połączenia jest możliwość przenoszenia dużych mocy na krótkim zasięgu poprzez zasilanie indukcyjne oraz małych mocy na znacznie większych odległościach przy wykorzystaniu zasilania poprzez fale radiowe.

Zasilanie poprzez promieniowanie elektromagnetyczne

Do technik zasilania bezprzewodowego, z wykorzystaniem promieniowania elektromagnetycznego, zaliczamy zasilanie poprzez fale radiowe, ale również poprzez promieniowanie z zakresu światła widzialnego np. światła słonecznego [99]. Zasilanie poprzez promieniowanie z zakresu światła widzialnego ma szerokie zastosowanie w zasilaniu urządzeń pracujących w sieciach IoT zlokalizowanych na dużych obszarach np. w nowoczesnym rolnictwie [100], nie ma jednak większego zastosowania praktycznego wewnątrz budynków. Światło ze standardowych żarówek i świetlówek nie przenosi wystarczającej ilości energii do zasilania czujników i urządzeń, ze względu na znacznie węższe spektrum przenoszonych częstotliwości, w stosunku do światła słonecznego. Występują specjalne lampy emitujące światło zbliżone do światła słonecznego, ale uzyskiwane moce nie byłyby wystarczające do zasilania czujników usytuowanych pod różnymi kątami względem źródła światła. Trudno byłoby również uzyskać penetrację przestrzeni wewnątrz budynku taką jak w przypadku fal radiowych. Techniki zasilania z wykorzystaniem promieniowania elektromagnetycznego skupiają się zatem wokół zastosowania promieniowania z zakresu fal radiowych. Systemy zasilania na drodze radiowej zyskały w ostatnich latach dużą popularność i obecnie trwają badania nad szerszym zastosowaniem w obszarze zasilania urządzeń o niskim poborze energii np. inteligentnych systemów

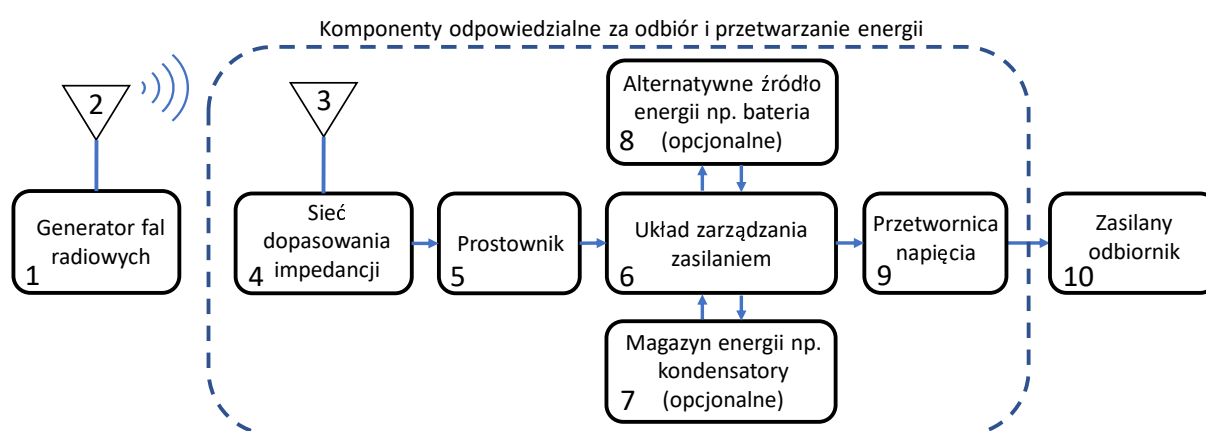
pomiarowych, elementów sieci Internetu Rzeczy oraz bezprzewodowych sieci czujników. Moc dostępna dla urządzeń zasilanych poprzez promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie fal radiowych maleje wraz odległością od nadajnika według wzoru 3.4 [101].

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (3.4)$$

gdzie:

P_r - moc odbierana, P_t - moc transmitowana, G_t - liniowy zysk anteny nadawczej, G_r - liniowy zysk anteny odbiorczej, λ - długość fali, R - odległość

Moce dostępne na odległości kilku metrów są zatem niskie, ale jednak w niektórych przypadkach wystarczające do zasilanie prostych urządzeń. Z powodzeniem wdrażane są systemy zasilania czujników w zastosowaniach IoT np. monitorujące temperaturę w pomieszczeniach lub zasilające zdalnie aktualizowane wyświetlacze cen w centrach handlowych (np. rozwiązania firmy Powercast). Urządzenia zazwyczaj magazynują energię przez dłuższy czas pracując w trybie uśpienia, po czym wracają na krótką chwilę do standardowego trybu pracy na czas wykonania pomiaru i przesłania danych. Tor zasilania rozpoczyna się od generatora (1), który emituje promieniowanie poprzez antenę nadawczą (2), jak przedstawiono na rysunku 3.12 [102]. Wygenerowana fala radiowa trafia do anteny odbiorczej (3), w której generuje się



Rysunek 3.12. Struktura układu zasilania poprzez fale elektromagnetyczne

napięcie przemienne. W celu zwiększenia efektywności przekazywania energii, stosuje się sieć sprzęgającą (4) dopasowującą impedancję linii transmisyjnej do impedancji anteny, pozwala to na uniknięcie zjawiska odbicia [103]. Najczęściej stosowana impedancja anteny to 50Ω i do takiej wartości jest dopasowana większość linii transmisyjnych. Kolejnym elementem toru zasilania jest prostownik (5) zamieniający prąd przemienne na stały, który następnie trafia do układu zarządzania procesem zasilania (6) [104]. Układ zarządzający odpowiada za sterowanie magazynowaniem energii w kondensatorze lub akumulatorze (7), dopasowanie i stabilizację napięcia wyjściowego, monitorowanie procesu zasilania, załączanie zasilanego układu oraz przełączanie na alternatywne źródło zasilania w postaci baterii lub akumulatora (8)

na czas braku dostępności do zasilania poprzez fale radiowe. Napięcia uzyskiwane na wyjściu prostownika, są zazwyczaj wielokrotnie niższe, od napięcia wymaganego do zasilenia układów. Ważnym elementem, który jest często zintegrowany z układem zarządzania jest zatem przetwornica napięcia (9). Od wydajności przetwornicy i minimalnego obsługiwanego przez nią napięcia wejściowego zależy uzyskiwany zasięg przekazywania energii do odbiornika (10). Istotne jest również stosowanie odpowiednich magazynów energii. Przy niskich przekazywanych mocach, prąd upływności kondensatorów może być porównywalny z prądem dostępnym poprzez system przekazywania energii, co w niektórych wypadkach uniemożliwi pracę układu. Należy zatem stosować akumulatory o niskim współczynniku samorozładowania lub kondensatory o niskich upływnościach i niskim współczynniku ESR (ang. *Equivalent Series Resistance*), odpowiadającym za straty w kondensatorze podczas przepływu prądu. Poza intencjonalnym zasilaniem poprzez dedykowany do tego celu nadajnik radiowy, urządzenia mogą być zasilane z wykorzystaniem rozproszonych w otoczeniu fal radiowych, generowanych przez urządzenia nas otaczające. Można odszukać udane eksperymenty wykazujące możliwość zasilania poprzez sygnały radiowe z zakresu częstotliwości odpowiadających stacjom radiowym i telewizyjnym, standardowi WiFi oraz sieciom komórkowym [105–107]. Rozpatrując zastosowania w ograniczonej przestrzeni (np. pomieszczeniu testowym) potencjalne moce, które mogą zostać uzyskane, są jednak znacznie niższe, od tych dostępnych przy wykorzystaniu nadajnika zasilającego, konstruowanego z myślą o zasilaniu urządzeń znajdujących się w odległości do kilku metrów. W zastosowaniach laboratoryjnych zdecydowanie bardziej uzasadnione wydaje się użycie nadajnika zasilającego w pomieszczeniu testowym.

3.5 Komunikacja układów cyfrowych

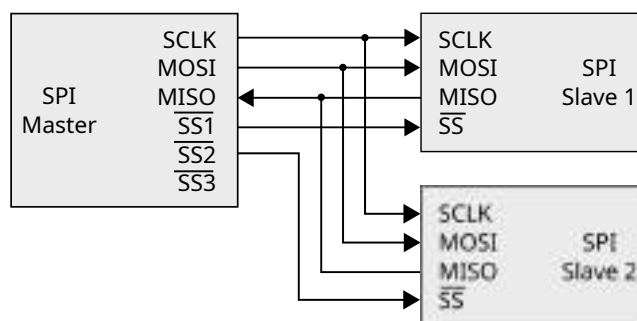
Duże znaczenie podczas konstruowania czujników inteligentnych mają standardy komunikacji szeregowej takie jak UART, SPI, I2C. Poprzez tego typu protokoły, mikrokontrolery mogą komunikować się z pozostałymi komponentami urządzenia, w tym z przetwornikami analogowo-cyfrowymi, za pomocą tylko kilku linii sygnałowych [108]. Urządzenia komunikujące się z mikrokontrolerem mogą znajdować się w obrębie tej samej płytki PCB lub poza nią i zostać podłączone przy wykorzystaniu przewodów łączeniowych. W przypadku układów Arduino i Raspberry Pi, popularne są moduły rozszerzeń podłączane, za pomocą standaryzowanych wyprowadzeń, co pozwala na znaczne rozszerzenie możliwości konstruowanych systemów przy wykorzystaniu komunikacji szeregowej [109]. Do protokołów transmisji szeregowej należy również standard USB popularny nie tylko w komputerach osobistych, ale również w komputerach jednopłytkowych takich jak Raspberry Pi, co daje możliwość podłączania różnego rodzaju czujników, a w tym mikrofonów i kamer. Za pomocą szeregowych protokołów komunikacji podłączane są również różnego rodzaju czujniki rozszerzające możliwości systemów pomiarowych i ułatwiające budowę czujników inteligentnych. Do komunikacji mikrokontrolera z przetwornikiem ADC został wytypowany protokół SPI.

Protokół SPI

Interfejs SPI (ang. *Serial Peripheral Interface*) jest jednym z najczęściej stosowanych interfejsów pozwalających, na komunikowanie się z urządzeniami peryferyjnymi systemów mikroprocesorowych ze względu na wysokie prędkości transmisji i wysoką niezawodność [110, 111]. Najczęściej za jego pomocą obsługiwane są przetworniki analogowo-cyfrowe, przetworniki cyfrowo-analogowe, karty pamięci, pamięci flash, zegary czasu rzeczywistego i wiele innych podzespołów niezbędnych z punktu widzenia działania nowoczesnych systemów mikroprocesorowych. Zazwyczaj obsługa układów peryferyjnych polega na dostępie do konkretnych rejestrów urządzenia w celu odczytania lub zmiany wartości. Komunikacja odbywa się synchronicznie poprzez trzy linie sygnałowe w przypadku komunikacji z jednym urządzeniem lub cztery w przypadku wykorzystania SPI jako magistrali sygnałowej dla wielu podzespołów elektronicznych:

- MISO (ang. *Master Input Slave Output*) – dane wejściowe do układu master
- MOSI (ang. *Master Output Slave Input*) – dane wyjściowe z układu master
- SCLK (ang. *Serial Clock*) – linia synchronizacyjna
- SS (ang. *Slave Select*) – linia wyboru układu (nazywana również CS od Chip Select)

Podczas komunikacji w standardzie SPI dane są wysyłane i odbierane w tym samym czasie w takt sygnału zegarowego, udostępnianego przez urządzenie typu Master, urządzeniom typu Slave. Odebranie bajtu danych wymaga zatem wysłania bajtu danych. Często powoduje to konieczność wysyłania bajtów bez zawartej informacji w celu otrzymania informacji zwrotnej np. z danymi pomiarowymi po wcześniejszym wskazaniu adresu, z którego mają być odczytane wartości rejestrów. Pomimo tego że linie MISO, MOSI i CLK są podłączone jednocześnie do wszystkich układów typu Slave, to w jednym czasie obsługiwany jest tylko układ wskazany przez sygnał na jednej z linii SS (rys. 3.13). Możliwa jest również konfiguracja podzespołów w układzie Daisy-Chain. Układy pracują wtedy jak rejestr przesuwany i jest wymagana tylko jedna linia SS dla wszystkich układów. Większość mikrokontrolerów ma dedykowane sterowniki sprzętowe lub programowe do obsługi SPI, każde urządzenie posiada jednak inny zestaw rejestrów, których obsługa musi zostać odpowiednio zaimplementowana.



Rysunek 3.13. Układy obsługiwane poprzez protokół SPI

3.6 Przetworniki analogowo-cyfrowe

Przetwornik analogowo-cyfrowy (ang. *ADC – Analog to Digital Converter*) jest to układ pozwalający na zamianę sygnału analogowego, na jego reprezentację w postaci cyfrowej, pozwalającą na dalsze przetwarzanie w urządzeniach cyfrowych [112]. W skrajnym przypadku można zbudować czujnik inteligentny wyłącznie w oparciu o moduł komunikacyjny z mikrokontrolerem, źródło zasilania i czujnik z wyjściem napięciowym, który zostanie obsługiwany przez zintegrowany z mikrokontrolerem przetwornik analogowo-cyfrowy. Przetworniki zintegrowane z mikrokontrolerami mają jednak zazwyczaj gorsze parametry pomiarowe od dedykowanych podzespołów w postaci niezależnych układów scalonych. Przetworniki dedykowane do pomiarów z wykorzystaniem konkretnych typów czujników, mają również dodatkowe funkcje, pozwalające na znaczne ułatwienie przeprowadzenia pomiarów takie jak: kondycjonowanie sygnału, filtrowanie, źródło prądowe do wzbudzenia czujników, uproszczoną kompensację temperaturą itp. Do podstawowych parametrów charakteryzujących przetworniki analogowo-cyfrowe można zaliczyć: rozdzielczość (np. 24 bity dla wysokiej klasy przetworników), częstotliwość próbkowania, typ przetwornika oraz różnego rodzaju wskaźniki określające błędy przetwarzania. Można wyróżnić kilka podstawowych typów przetworników ADC: Pipeline, Integrujący, SAR (ang. *Successive Approximation Register*), Flash oraz Sigma-Delta [113] (tab. 3.3).

	Flash	Pipeline	Delta-sigma	SAR
Częstotliwość próbkowania	Bardzo wysoka (do Gsps)	Wysoka (do 100Msps)	Średnia/Niska (poniżej 1Msps)	Dobra (do 10 Msps)
Rozdzielczość	Niska (do 8 bitów)	Wysoka (do 16 bitów)	Bardzo wysoka (do 31 bitów)	Wysoka (do 18 bitów)
Zużycie energii	Wysokie	Średnie	Niskie	Niskie
Koszt	Wysoki	Średni	Niski	Niski
Typowe zastosowania	- Oscyloskopy, - Szerokopasmowe pomiary radiowe, - Komunikacja optyczna - Radary	- matryce CCD, - telekomunikacja - sprzęt video - modemy - sprzęt medyczny	- Przetwarzanie dźwięku, - Instrumnetacja przemysłowa, - Pomiary temperatury	- Sprzęt medyczny, - Instrumnetacja przemysłowa, - Wbudowane w mikrokontrolery np. AVR

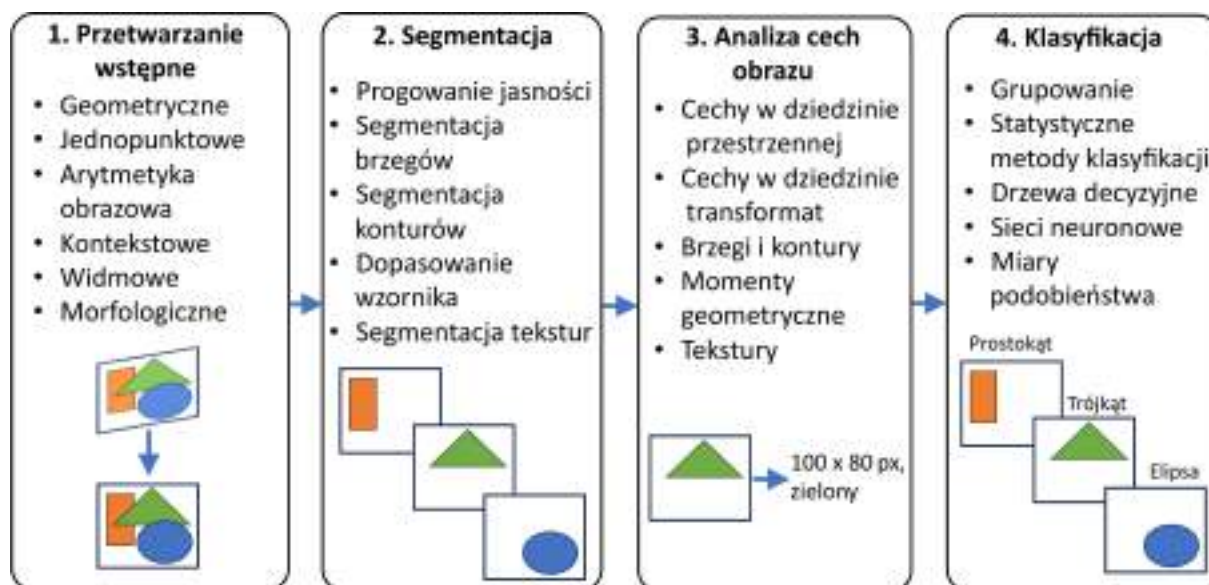
Tabela 3.3. Porównanie wybranych typów przetworników analogowo-cyfrowych

Po przeanalizowaniu możliwości najpopularniejszych przetworników ADC, została podjęta decyzja o wykorzystaniu przetwornika typu Delta-sigma w przygotowywanych projektach. Przetworniki tego typu mają niskie zużycie energii, co jest kluczowe dla zastosowań bezprzewodowych. Wysoka rozdzielczość pozwoli na wykonywanie dokładnych pomiarów. Niska częstotliwość próbkowania nie stanowi problemu, ponieważ projekty skupiają się na pomiarach z niskimi częstotliwościami, ze względu na ograniczenie zużycia energii. Został wybrany przetwornik

MAX11410 [114] firmy Analog Devices, komunikujący się przez wcześniej omawiany interfejs SPI. Jest to przetwornik dedykowany do obsługi czujników, posiadający funkcje ułatwiające ich obsługę [115]. Możliwości i sposób użycia przetwornika zostanie omówiony dokładnie w rozdziałach opisujących prace projektowo-badawcze.

3.7 Podstawy metod analizy obrazu w detekcji zmian

Wprowadzenie w laboratoriach lotniczych inteligentnych czujników i układów pomiarowych daje możliwości skorzystania z wielu algorytmów przetwarzania danych. Metody związane z analizą obrazu są jednymi z najbardziej interesujących i dających szerokie perspektywy rozwoju z punktu widzenia wykorzystania w laboratoriach. Analiza obrazu (ang. *machine/computer vision*) dotyczy metod wydobywania informacji z różnego rodzaju obrazów cyfrowych, które można zdefiniować jako funkcje dwuwymiarową $f(x,y)$, gdzie x i y odpowiadają współrzędnym przestrzennym, a wartość wynikowa amplitudzie np. kolorowi, stopniowi szarości lub wartości binarnej [116]. Do obrazów cyfrowych zaliczamy również grafikę wektorową, w której obraz jest zapisany przy pomocy funkcji matematycznych. Algorytmy analizy obrazu obejmują etapy przetwarzania wstępnego, segmentacji, analizy cech oraz klasyfikacji, tak jak zostało to przedstawione na rysunku 3.14 [117]. Zostały omówione tylko wybrane metody uznane za istotne z punktu widzenia realizowanego projektu, ukierunkowanego na detekcję zmiany obrazu wzorcowego, w postaci wystąpienia wycieku. Zatem nacisk został położony na przetwarzanie wstępne, segmentację poprzez progowanie i wykrywanie krawędzi oraz klasyfikację na podstawie cech przestrzennych i koloru obiektu wykrytego na obrazie rejestrowanym przez kamerę.



Rysunek 3.14. Etapy przetwarzania i analizy obrazu

3.7.1 Przetwarzanie wstępne

Forma obrazu zarejestrowanego podczas procesu akwizycji często nie jest wygodna do przeprowadzania procesu analizy obrazu. Przykładowo obraz może być zarejestrowany przez kamerę umieszczoną pod kątem, jest zaszumiony lub zniekształcony na skutek niedoskonałości kamery. Rozwiązaniem tego rodzaju problemów jest przeprowadzenie wstępnego przetwarzania obrazu, którego podstawowym celem jest przygotowanie obrazu do analizy w dalszych etapach. Do podstawowych operacji stosowanych we wstępnym przetwarzaniu obrazu zalicza się przekształcenia geometryczne, jednopunktowe, arytmetykę obrazową, przekształcenia kontekstowe, widmowe i morfologiczne [118, 119].

Przekształcenia geometryczne

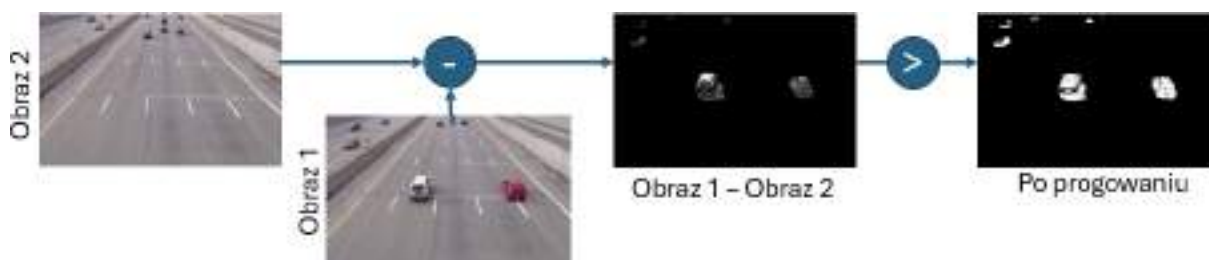
Do przekształceń geometrycznych zalicza się operacje takie jak obroty, przesunięcie, odbicia i wszystkie inne przekształcenia mające na celu korektę błędów związanych z ustawieniem kamery lub dopasowaniem obrazu do potrzeb dalszych algorytmów analizy obrazu. Można w ten sposób niwelować typowe zniekształcenia trapezowe, poduszkowe i beczkowe.

Przekształcenia jednopunktowe

Przekształcenia punktowe (bezkontekstowe) to operacje, w których modyfikacja punktu obrazu zależy od operacji wykonanych na odpowiadającym mu punkcie w obrazie źródłowym, bez uwzględnienia stanu punktów sąsiadujących. Nie występuje zmiana relacji geometrycznych. Podstawowymi operacjami jednopunktowymi są: rozjaśnianie, ściemnianie, binaryzacja lub negatyw. Pozwalają one wyszczególnić informacje trudne do odczytania z obrazu źródłowego.

Arytmetyka obrazowa

Arytmetyka obrazowa to operacje przeprowadzane na dwóch lub większej liczbie obrazów w celu uzyskania obrazu wynikowego. Do takich operacji zaliczamy dodawanie, odejmowanie, mnożenie, dzielenie i operacje bitowe. Z punktu widzenia tematyki pracy najbardziej interesującą operacją arytmetyczną jest odejmowanie zapisanego obrazu tła, od aktualnego obrazu rejestrowanego przez kamerę, co pozwala w prosty sposób wyszczególnić zmianę. Operacje arytmetyczne są podstawą działania wielu systemów monitoringu (rys. 3.15) [120, 121].



Rysunek 3.15. Efekt odejmowania tła z progowaniem

Przekształcenia kontekstowe

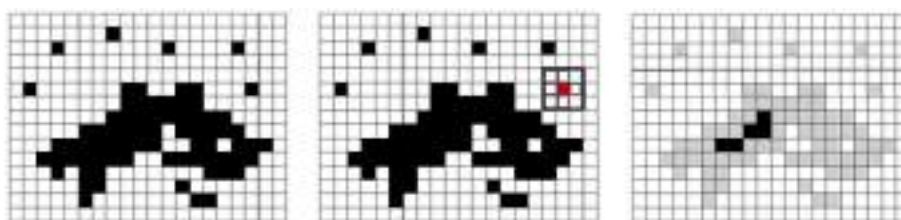
Przekształcenie kontekstowe, w odróżnieniu od przekształceń punktowych, wykorzystują nie tylko stan punktu odpowiadającego w obrazie źródłowym, ale również stan punktów sąsiadujących. Celem tego rodzaju przekształceń jest zredukowanie wpływu szumu, wzmocnienie widoczności elementów obrazu lub rekonstrukcja obrazu. Narzędziem służącym do przeprowadzenia przekształcenia kontekstowego może być jeden z wielu rodzaju filtrów (rys. 3.16). Wyróżnia się dwie podstawowe grupy filtrów: filtry liniowe wykonujące operacje z wykorzystaniem liniowej kombinacji pikseli obrazu (np. górnoprzepustowe, dolnoprzepustowe, konwolucyjne) oraz filtry nieliniowe wykorzystujące funkcje nieliniowe (np. medianowy) [122].



Rysunek 3.16. Wyszczególnienie obiektu z wykorzystaniem filtru górnoprzepustowego

Przekształcenia morfologiczne

Podstawową różnicą pomiędzy przekształceniami morfologicznymi, a filtrami jest to, że element obrazu jest modyfikowany tylko wtedy gdy jest spełniony określony warunek logiczny. Algorytm sprawdza w sposób iteracyjny, czy otoczenie kolejnych pikseli jest zgodne z wzorcem elementu strukturalnego. Gdy wystąpi zgodność jest przeprowadzana operacja na badanym punkcie obrazu np. zmiana koloru lub jasności. Podstawowe najczęściej stosowane operacje morfologiczne to erozja i dylatacja [123]. Erozja służy do usuwania obszarów o małej powierzchni (rys. 3.17). Przykładowo mogą one być efektem odejmowania obrazu zapisanego tła od aktualnego obrazu gdy występują przesunięcia kamery na skutek wibracji. Punkt centralny otrzymuje wartość zero, gdy chociaż jeden piksel z otoczenia wyznaczonego przez element strukturalny ma wartość zero. Operacją przeciwną jest dylatacja. W operacji dylatacji element centralny przyjmuje wartość 1, gdy chociaż jeden z pikseli w obszarze ma wartość 1. Operacja dylatacji pozwala w pewnym stopniu zredukować zmniejszenie większych obszarów w wyniku operacji erozji i często jest przeprowadzana właśnie po niej.



Rysunek 3.17. Efekt przeprowadzenia operacji erozji

3.7.2 Segmentacja

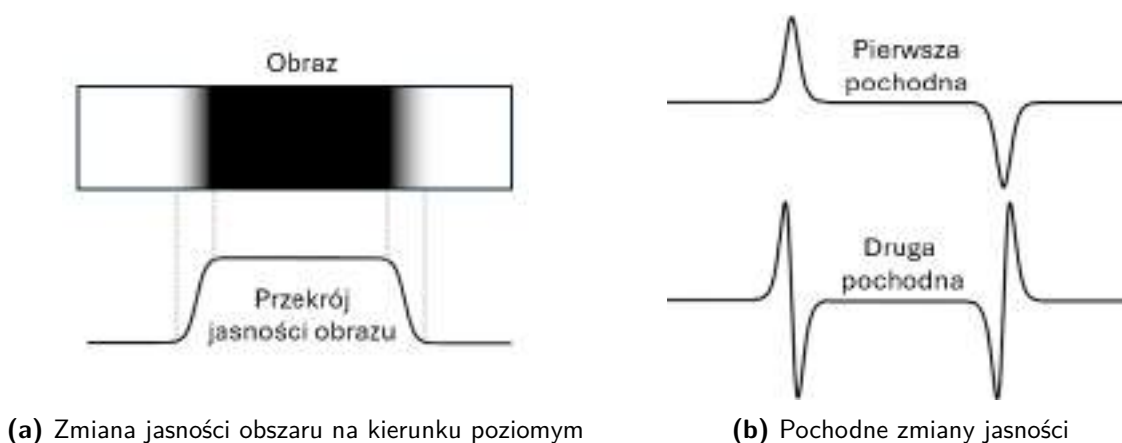
Segmentacja obrazu jest procesem prowadzącym do podziału obrazu, przygotowanego podczas wstępnego przetwarzania obrazu, na obszary odpowiadające obiektom widocznym na zarejestrowanym obrazie [124–128]. Obszary są wydzielane na podstawie przyjętego kryterium. Głównym celem segmentacji jest przygotowanie obrazu do dalszej analizy cech obrazu i klasyfikacji. Podstawowymi operacjami stosowanymi podczas segmentacji jest: progowanie jasności, segmentacja na podstawie brzegów i konturów, dopasowanie do wzornika, segmentacja na podstawie tekstur i kolorów. Z punktu widzenia dalszych prac projektowych najbardziej istotna jest segmentacja na podstawie progowania jasności oraz metody wykrywania krawędzi.

Progowanie jasności

Wyszczególnienie obiektów na obrazie poprzez progowanie jasności jest jedną z najbardziej podstawowych metod segmentacji obrazu. Punkty są dzielone na dwie grupy na podstawie przekroczenia lub nieprzekroczenia wartości progowej (progowanie jednopoziomowe) lub na kilka grup gdy występują więcej przedziałów przyporządkowania (progowanie wielopoziomowe). Można otrzymać w ten sposób obrazy binarne, które mogą posłużyć jako maska pozwalająca na wyodrębnienie obiektów z obrazu, przy wykorzystaniu arytmetyki obrazowej. Progowanie może mieć charakter globalny (gdy próg dotyczy całego obrazu) lub lokalny (np. średnia wartość dla danego obszaru).

Wykrywanie krawędzi - metody I i II rzędu

Wykrywanie krawędzi pozwala wyszczególnić obiekty poprzez analizę zmian jasności sąsiadujących punktów obrazu. Kolorowy obraz jest transformowany do skali odcieni szarości, dzięki czemu kolor każdego piksela jest reprezentowany tylko przez jedną liczbę (zazwyczaj z zakresu 0-255), co upraszcza przeprowadzanie obliczeń. Przebieg jasności przy przekroczeniu brzegu obiektu charakteryzuje się znaczną stromością, dzięki czemu szeroko wykorzystuje się metody bazujące na wyznaczaniu lokalnych pochodnych pierwszego rzędu (rys. 3.18) [129].



Rysunek 3.18. Detekcja brzegów z wykorzystaniem pochodnych

Operator Robertsa jest najprostszym z operatorów gradientowych i wynika wprost z matematycznej definicji różniczki (wzór 3.5) [130, 131]. W obrazie dyskretnym przyrost jest równy jednemu pikselowi, przyjmuje się więc, że $\Delta x = 1$, po czym można zapisać równania dla kierunku pionowego i poziomego (wzór 3.6). Operację różniczkowania zastępuje się operacją splotu analizowanego okna obrazu z macierzami Robertsa dla kierunku pionowego i poziomego (wzór 3.7), o współczynnikach wynikających z poprzednich wzorów.

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x, y) - f(x, y)}{\Delta x} \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = f(x + 1, y) - f(x, y); \frac{\partial f}{\partial y} = f(x, y + 1) - f(x, y) \quad (3.6)$$

$$z_{i,j} = |W_{i,j} * R_1| + |W_{i,j} * R_2| \quad (3.7)$$

Macierz W_{ij} jest fragmentem obrazu wejściowego o wartościach pikseli reprezentowanych przez x_{ij} , macierze R_1 oraz R_2 są maskami metody Robertsa (wzór 3.8), a $z_{i,j}$ jest nowym obliczonym pikselem obrazu wynikowego,

$$W_{i,j} = \begin{bmatrix} x_{i,j} & x_{i+1,j} \\ x_{i,j+1} & x_{i+1,j+1} \end{bmatrix} \quad R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad R_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Finalnie obliczenia sprowadzają się do wyznaczenia różnic wartości punktów dla poszczególnych kierunków, zgodnie ze współczynnikami wynikającymi z przyjętej metody, oraz obliczenia sumy ich wartości bezwzględnych (wzór 3.12).

$$z_{i,j} = |x_{i,j} - x_{i+1,j+1}| + |x_{i+1,j} - x_{i,j+1}| \quad (3.9)$$

Metoda Robertsa jest prosta obliczeniowo, jednak nowy punkt obrazu nie jest umieszczany w środku analizowanego obszaru ze względu na liczbę elementów. Można to rozwiązać wykorzystując operator Prewitta (wzór 3.10) wykorzystujący macierze współczynników o wymiarach 3x3 lub operator Sobela (wzór 3.11), który dodatkowo przeprowadza operacje wzmocnienia bezpośredniego otoczenia piksela. Przy użyciu tych operatorów jest możliwe analizowanie również bezpośrednio kierunków skośnych.

$$P_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad P_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$S_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad S_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Oprócz operatorów gradientowych omówionych powyżej szeroko wykorzystuje się algorytmy bazujące na obliczaniu drugiej pochodnej funkcji obrazu [130, 131]. Miejsce przejścia przez zero drugiej pochodnej oznacza wystąpienie krawędzi. Pozwala to na uzyskanie krawędzi o szerokości tylko jednego piksela. Najczęściej stosowanym operatorem wykorzystującym drugą pochodną jest operator Laplace'a, inaczej zwany laplasjanem wzór 3.9.

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (3.12)$$

Na drodze do otrzymania przekształcenia do postaci dyskretnej wykonuje się obliczenia drugiej pochodnej dla kierunku poziomego (wzór 3.13), przeprowadzając również operację wyśrodkowania (wzór 3.14), następnie analogiczne operacje dla kierunku pionowego (wzór 3.15). Laplasjan otrzymuje się jako sumę drugich pochodnych dla poszczególnych kierunków.

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = f(x+2, y) - 2f(x+1, y) + f(x, y) \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = f(x+1, y) - 2f(x, y) + f(x-1, y) \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = f(x, y+1) - 2f(x, y) + f(x, y-1) \quad (3.15)$$

$$\nabla^2 f = f(x-1, y) + f(x+1, y) - 4f(x, y) + f(x, y-1) + f(x, y+1) \quad (3.16)$$

Z tej postaci łatwo już uzyskać macierz maski, która pozwoli obliczyć laplasjan dla analizowanego fragmentu obrazu wejściowego poprzez obliczenie splotu (podobnie jak przedstawiono dla metody Robertsa).

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Macierze masek laplasjanu są symetryczne w każdym kierunku. Dzięki temu splot laplasjanu z obszarem obrazu pozwala na wykrycie krawędzi niezależnie od kierunku zmiany. Stosowanie laplasjanów wprowadza jednak wzmocnienie szumów. Problem ten jest zredukowany w metodzie LoG, w której obraz jest wygładzany z użyciem operatora filtru Gaussa (wzór 3.18), a następnie jest obliczana druga pochodna (wzór 3.19). Tak jak w poprzednich metodach obliczenia w postaci dyskretnej przeprowadza się przez przeprowadzenie operacji splotu, w tym przypadku w pierwszej kolejności z operatorem Gaussa, a następnie z operatorem Laplace.

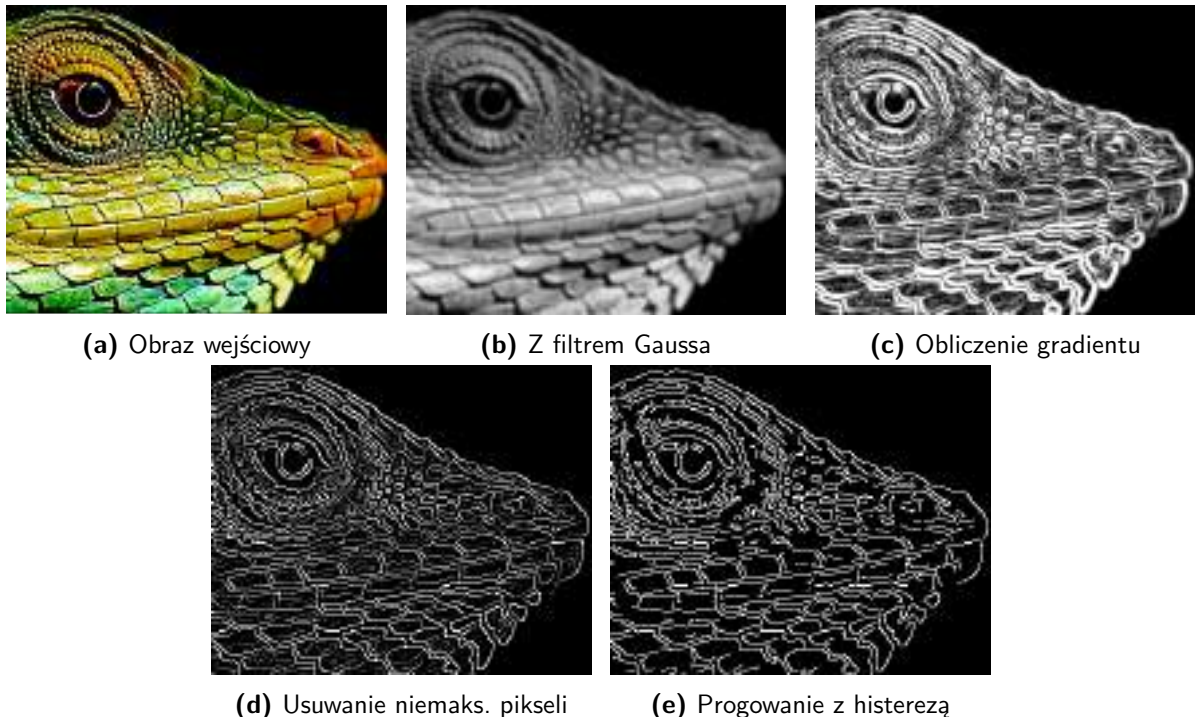
$$G(x, y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.18)$$

$$\text{LoG} = \frac{1}{\pi\sigma^4} \left(\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2} - 1\right) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.19)$$

Wykrywanie krawędzi - algorytm Canny'ego

Metoda Canny'ego, będąca wielostopniowym algorytmem detekcji krawędzi, została opracowana w 1986 [132–134]. W praktyce algorytm Canny'ego składa się następujących kroków:

1. **Redukcja szumów** (ang. *Gaussian blur*) - Poprzez zastosowanie filtru Gaussa obraz w skali szarości staje się delikatnie rozmyty, przez co mniej zakłócony (rys. 3.19b).
2. **Wyznaczenie gradientów** (ang. *Intensity gradients*) - Wstępne wyznaczenie krawędzi za pomocą jednego z wcześniej omawianych algorytmów gradientowych (rys. 3.19c).
3. **Tłumienie punktów niemaksymalnych** (ang. *non-maximal suppression*) - Piksele, w których moduł gradientu nie jest maksymalny w stosunku do sąsiednich punktów, na kierunku prostopadłym do krawędzi, zostają wygaszone (rys. 3.19d). Sprawdzany jest obszar 3x3 wokół punktu.
4. **Podwójne progowanie** (ang. *Double Thresholding*) - Punkty o wartościach powyżej górnego progu zostają rozpoznane jako potencjalna mocna część konturu, punkty pomiędzy limitem dolnym i górnym jako punkty kandydujące, a pozostałe są odrzucane.
5. **Zastosowanie histerezy** (ang. *Edge tracking by hysteresis*) - Jeśli chociaż jeden z pikseli bezpośrednio sąsiadujących z pikselem kandydującym został uznany jako mocna część konturu, to rozpatrywany piksel zostaje uznany za część konturu (rys. 3.19e).



Rysunek 3.19. Kolejne kroki przetwarzania obrazu metodą Canny'ego

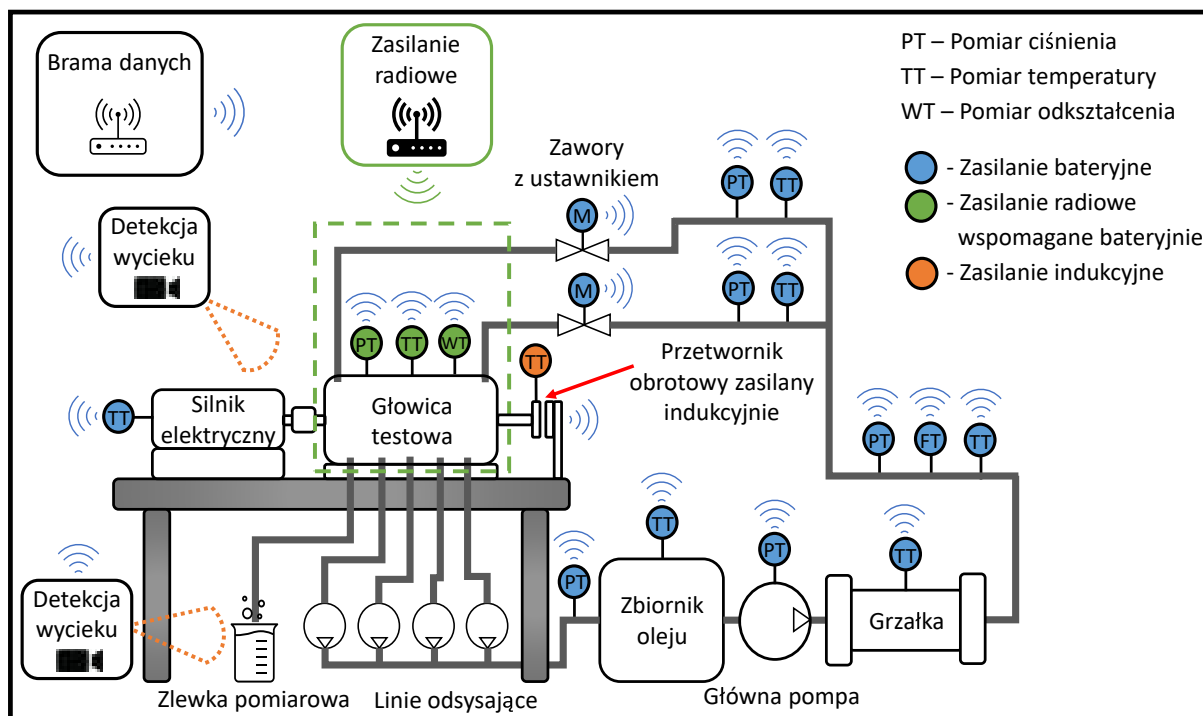
3.7.3 Analiza cech obrazu i klasyfikacja

Etap analizy cech obrazu ma za zadanie dostarczyć parametry charakteryzujące obiekty wyszczególnione podczas procesu segmentacji [135–137]. Mogą to być cechy geometryczne (np. szerokość, długość, pole powierzchni, obwód konturu), cechy obliczane z wykorzystaniem transformat (np. transformaty Fouriera), parametry związane z kształtem konturu (np. stopień zmienności), momenty geometryczne oraz barwa i tekstura. Wyszczególnione parametry następnie służą jako dane wejściowe w procesie klasyfikacji, którego podstawowym celem jest przypisanie obiektów do określonej grupy charakteryzującej się podobnymi cechami w ustalonym zakresie. Występuje bardzo wiele metod klasyfikacji o zróżnicowanym stopniu skomplikowania i efektywności [138, 139]. Do najprostszych zastosowań wystarczające może okazać się podejście polegające na progowaniu parametrów. W bardziej skomplikowanych zastosowaniach, gdzie jednak różnice cech są wystarczająco wyraźne, mogą sprawdzić się algorytmy polegające na grupowaniu obiektów według wyszczególnionych parametrów, analizie statystycznej, drzewach decyzyjnych lub miarach prawdopodobieństwa. Obecnie jednak szczególnie mocno rozwijają się metody związane z metodami sztucznej inteligencji wykorzystującymi sieci neuronowe [140, 141]. Trenowanie tego rodzaju systemów na podstawie zestawu danych pozwala na uzyskanie wysokiej skuteczności klasyfikacji obiektów. W ten sposób można analizować złożone obrazy często nie możliwe do sklasyfikowania innymi metodami. Zadanie budowy i trenowania sieci neuronowej jest obecnie znacznie bardziej dostępne niż jeszcze dziesięć lat temu, ze względu na biblioteki takie jak Tensor Flow (2015 r.), dostarczające zestaw niezbędnych narzędzi [142–144]. Standardem we wszystkich etapach analizy obrazu stało się korzystanie z biblioteki OpenCV (2000 r.) [145, 146]. Zawiera ona narzędzia niezbędne do wstępnego przetwarzania obrazu, segmentacji oraz podstawowe funkcje umożliwiające klasyfikację. W bardziej skomplikowanych problemach klasyfikacji może być wykorzystywana wraz z innymi bibliotekami takimi jak Tensor Flow. Z punktu widzenia rozpoznawania wycieków najistotniejsze jest poznanie podstawowych cech geometrycznych obiektów (szerokość, długość, powierzchnia, współrzędne środka) oraz analiza tekstury i koloru. Ze względu na to, że testy lotnicze są wykonywane w zamkniętych pomieszczeniach przy stałych warunkach oświetleniowych, to klasyfikacja może zostać przeprowadzona już na podstawie tych podstawowych cech, co zostało zademonstrowane w rozdziale 4.4. Praca nie obejmuje bardziej skomplikowanych metod klasyfikacji, w związku z czym przegląd literatury nie obejmuje szczegółowego przeglądu tego szerokiego obszaru. Uzyskane rezultaty mogą jednak posłużyć jako baza do rozwoju projektu w tym kierunku. Taka potrzeba może wystąpić gdy system miałby pracować poza zamkniętym pomieszczeniem testowym, gdzie mogą występować różnego rodzaju zakłócenia.

Rozdział 4

Inteligentne przetworniki pomiarowe dedykowane pracy w laboratoriach komponentów lotniczych

W rozdziale przedstawiono prace projektowo-badawcze, zaplanowane na podstawie przeglądu wiedzy (rys. 4.1). Tematyka projektów w podrozdziałach 4.1-4.5 została dobrana tak, żeby w jak największym stopniu odpowiedzieć na pytanie badawcze dotyczące perspektyw wdrożenia bezprzewodowych inteligentnych przetworników i układów pomiarowych w obszarze laboratoriów lotniczych. W rozdziale 4.1 przedstawiono projekt i badania bezprzewodowego przetwornika pomiarowego, w rozdziale 4.2 adaptację projektu do wymagań testów obrotowych, w rozdziale 4.3 efekty prac nad inteligentnym bezprzewodowym ustawnikiem pozycyjnym, w rozdziale 4.4 algorytmy analizy obrazu umożliwiające monitorowanie stanowisk badawczych, a w rozdziale 4.5 przykładowy sposób wdrożenia sieci przetworników.



Rysunek 4.1. Koncepcja wdrożenia układów pomiarowych na stanowisku badawczym

4.1 Inteligentny bezprzewodowy przetwornik pomiarowy

W rozdziale zostaną przedstawione prace projektowo-badawcze, prowadzące do skonstruowania bezprzewodowego inteligentnego przetwornika pomiarowego, mogącego pracować ze standardowymi czujnikami, wykorzystywanymi w lotniczych laboratoriach badawczych.

4.1.1 Założenia projektowe

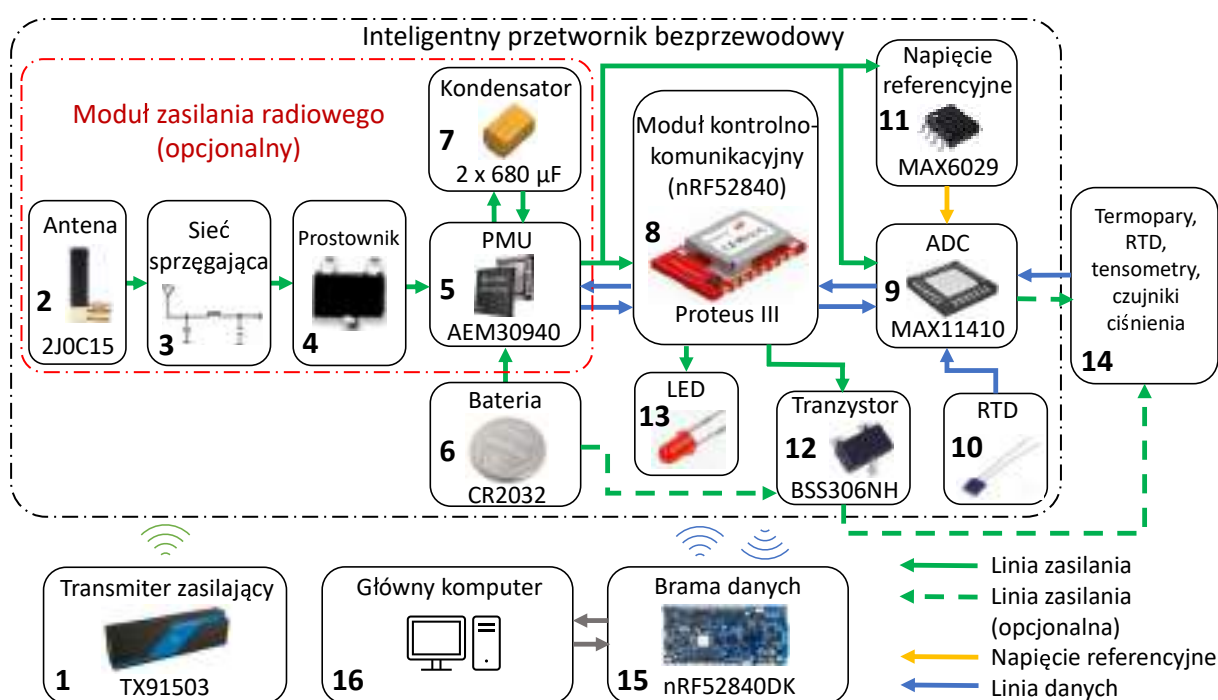
Na podstawie przeprowadzonego w rozdziale drugim przeglądu wiedzy, zostały przyjęte założenia projektowe, odnośnie projektowanego bezprzewodowego przetwornika inteligentnego dedykowanego pracy w laboratorium lotniczym, zestawione poniżej:

- współpraca z czujnikami wykorzystywanymi w instrumentacji stanowisk testowych takimi jak: termoelektryczne i rezystancyjne czujniki temperatury, tensometry (w tym tensometryczne czujniki siły i ciśnienia) oraz czujniki z wyjściem napięciowym;
- zasilanie bateryjne i opcjonalne zasilanie bezprzewodowe w postaci modułu;
- bardzo niskie zużycie energii zapewniające długi czas pracy przy zasilaniu baterijnym;
- praca z częstotliwością pomiarową mieszczącą się w zakresie 0,1-2 Hz;
- komunikacja bezprzewodowa poprzez BLE (ang. *Bluetooth Low Energy*);
- możliwość użytkowania w strukturze sieci bezprzewodowej;
- małe wymiary urządzenia pozwalające na swobodną instalację;
- praca w sieci przetworników o topologii gwiazdy.

Zaprojektowany przetwornik pomiarowy ma w znaczącym stopniu usprawnić przygotowywanie testów w laboratoriach lotniczych, w związku z czym musi być zdolny do obsługi klasycznych czujników używanych podczas badań. Prace skupiają się na pomiarach z częstotliwościami z zakresu 0,1-2 Hz, co jest wystarczające przy większości badań wykonywanych na ustalonych punktach programu testu. Wyższe częstotliwości pomiarowe utrudniałyby również zastosowanie opcjonalnego zasilania radiowego. Niskie zużycie energii urządzeń bezprzewodowych jest uzyskiwane na drodze cyklicznego wchodzenia w stan uśpienia i wybudzania w celu wykonywania pomiaru, co przy zwiększaniu częstotliwości pomiarowych przestaje przynosić wystarczające efekty. Niskie zużycie energii jest istotne ze względu na wydłużenie czasu pracy na baterii i zwiększenie zasięgu zasilania bezprzewodowego. Pomimo licznych zalet zasilania bezprzewodowego, przekazywana moc oraz zasięg jest znacznie ograniczona, zwykle aplikowana dla urządzeń o wymaganym zasięgu do kilku metrów. Problemy z zasilaniem bezprzewodowym pojawiają się również przy znacznym zasłonięciu toru pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem. Korzystnie jest zatem zwielokrotnić źródło zasilania i skorzystać z zasilania baterijnego używanego w przypadkach braku dostępu do wystarczającej mocy przekazywanej na drodze bezprzewodowej lub w sytuacjach, gdy zasilanie bezprzewodowe nie jest konieczne.

4.1.2 Struktura systemu

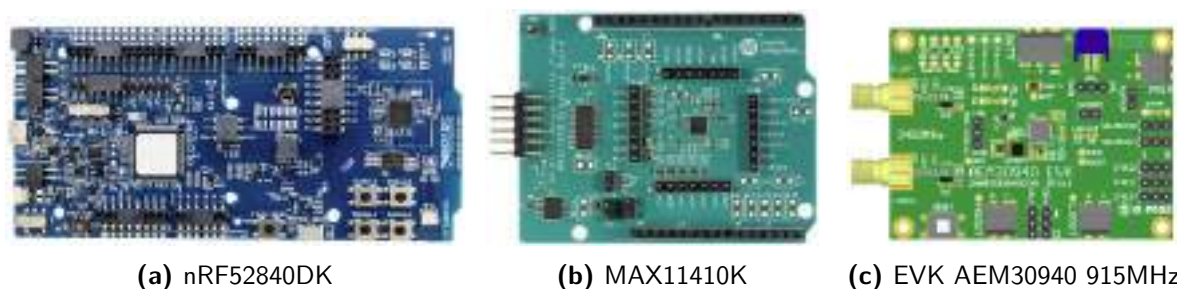
Podstawowym etapem prac nad projektem, było wykorzystanie informacji zdobytych podczas przeglądu wiedzy oraz testów poszczególnych komponentów do zaproponowania struktury konstruowanego urządzenia (rys. 4.2), spełniającej przedstawione wcześniej wymagania projektowe. Zgodnie z założeniami przetwornik został podzielony na dwa moduły odpowiedzialne za pomiary i komunikację oraz za zarządzanie zasilaniem bezprzewodowym i baterijnym [147].



Rysunek 4.2. Struktura bezprzewodowego systemu pomiarowego o zasilaniu radiowo-baterijnym

Gdy wykorzystywany jest moduł zasilania bezprzewodowego wszystkie obwody w systemie pomiarowym są zasilane przez nadajnik zasilający o mocy 3W i częstotliwości 915 MHz (1), który współpracuje z wymienną anteną (2). W testach wykorzystano antenę o maksymalnym wzmacnieniu szczytowym 3,3 dBi. Sieć dopasowująca impedancję (3) zwiększa efektywność przenoszenia mocy przez zredukowanie zjawiska odbicia. Napięcie przemienne jest przekształcane do postaci napięcia stałego w prostowniku (4). Następnie wykorzystywany jest układ PMU (ang. *Power Management Unit*) (5), zarządzający dostępnymi źródłami zasilania. W sytuacji bez dostępu do bezprzewodowego zasilania lub gdy operator zrezygnował z zasilania bezprzewodowego, moduł PMU przełącza się na zasilanie bateryjne (6). Gdy dostępne jest źródło zasilania radiowego, moduł korzysta tylko z tego źródła i magazynuje nadmiar energii w kondensatorach (7), zwłaszcza pomiędzy cyklami pomiarowymi, gdy system jest w trybie uśpienia. Układ PMU podwyższa i stabilizuje napięcie wykorzystywane do zasilania innych obwodów na płytce PCB, co pozwala na pracę układu przy bardzo niskim poziomie napięcia wejściowego oraz rozszerza zakres działania z wykorzystaniem bezprzewodowego przesyłu energii. W podstawowej konfiguracji przetwornik może pracować bez modułu zasilania

radiowego, który jest wtedy zastępowany zworką przekazującą zasilanie bezpośrednio z baterii. W obu przypadkach główny moduł komunikacyjno-sterujący (8) odpowiada za komunikację bezprzewodową, przetwarzanie danych oraz współpracę z przetwornikiem ADC (Analog to Digital Converter) (9). Rezystancyjny czujnik temperatury (10) jest wykorzystywany do kompensacji, podczas pomiarów wykonywanych poprzez czujniki termoelektryczne temperatury (inaczej termopary). W celu zwiększenia dokładności pomiarów układ wykorzystuje źródło napięcia odniesienia w postaci układu scalonego (11). Transystor MOSFET (12) załącza wybrane źródło zasilania podczas pomiarów za pomocą tensometrów i czujników z wyjściem napięciowym. Dioda LED (13) służy do sprawdzania programu i podstawowej komunikacji z użytkownikiem. Wszystkie sygnały mierzone przez czujniki (14) są zamieniane na postać cyfrową, wysyłane do bramy danych (15), a następnie do głównego systemu kontrolno-pomiarowego laboratorium (16). Zaplanowanie przedstawionej struktury układu wymagało przeprowadzenia szeregu testów dotyczących komunikacji, pomiarów i zasilania układu. Testy częściowe, prowadzące do oceny poszczególnych rozwiązań, były wykonywane z wykorzystaniem modułów rozwojowych, pozwalających na zapoznanie się z właściwościami wytypowanych podzespołów o niskim zużyciu energii (rys. 4.3). Prace wykonane przy użyciu zestawów rozwojowych układów nRF52840, MAX11410 oraz AEM30940 pozwoliły na zaplanowanie struktury i sposobu obsługi pomiarów, komunikacji oraz zasilania.



(a) nRF52840DK

(b) MAX11410K

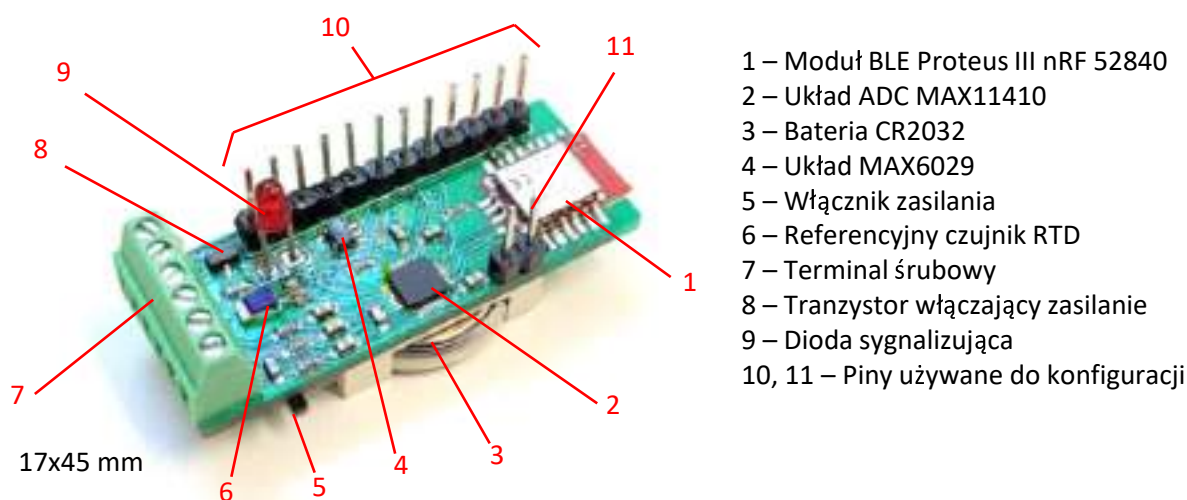
(c) EVK AEM30940 915MHz

Rysunek 4.3. Moduły rozwojowe wykorzystane podczas wstępnych badań

W fazie koncepcyjnej projektu były rozpatrywane trzy scenariusze bezprzewodowego zasilania i zarządzania zasilaniem: ciągłe bez przetwornicy podwyższającej napięcie, impulsowe z przetwornicą podwyższającą oraz ciągłe z przetwornicą podwyższającą. Pierwsze dwa rozwiązania zostały rozpoznane z wykorzystaniem układów P1110B i P2110B, będących kompletnymi modułami dedykowanymi do odzyskiwania energii dla częstotliwości 915 MHz. Po przeprowadzeniu prostych sprawdzeń, wykorzystanie tych układów zostało odrzucone, ze względu na zbyt mały poziom generowanego niestabilizowanego napięcia przez układ P1110B oraz zmienną częstotliwość załączania podwyższonego i stabilizowanego napięcia wyjściowego przez układ P2110B, wynikającą z czasu ładowania kondensatora. Zmienna częstotliwość wykonywania pomiarów byłaby problematyczna z punktu widzenia analizy wyników testów w laboratoriach. Kolejne testy, przygotowujące do zaplanowania struktury realizowanego projektu, były już przeprowadzane dla układu AEM30940.

4.1.3 Projekt PCB

Projekt przetwornika został zorganizowany w postaci dwóch współpracujących modułów. Pierwsza płytki PCB (rys. 4.4) pełni główną rolę i odpowiada za pomiary, przetwarzanie danych oraz komunikację (złączniki 2 i 3). Moduł bazowy może być używany niezależnie od drugiej płytki, gdy jedynym źródłem jest bateria. W takim wypadku nie jest jednak dostępna przetwornica napięcia, więc bateria może być używana tylko w zakresie 2,7-3,6 V, co jest granicami dla zastosowanych komponentów elektronicznych. Pozwala to na pracę z bateriami litowymi typu CR2032, w znacznej części jej charakterystyki rozładowania. Po zmianie złącza baterii, znajdującego się na dolnej stronie modułu, można również skorzystać z różnego rodzaju baterii litowo-polimerowych lub litowo-jonowych, które pracują w tym zakresie napięć. Gdy jest konieczne skorzystanie z bezprzewodowego przesyłu energii, drugi moduł (złączniki 4 i 5) powinien być zainstalowany na górze płytki komunikacyjno-pomiarowej (rys. 4.5 i 4.6). Źródło napięcia odniesienia oraz wybór źródła sterowanego tranzystorem dokonuje się za pomocą dostępnych dla użytkownika zworek, w sposób przedstawiony w kolejnych rozdziałach.



Rysunek 4.4. Bazowy moduł przetwornika odpowiadający za pomiary i komunikację



Rysunek 4.5. Moduł odpowiadający za zasilanie bezprzewodowe



Rysunek 4.6. Przetwornik z zainstalowanym modułem zasilającym (przed zlutowaniem)

4.1.4 Komunikacja bezprzewodowa i struktura programu

Do zapewnienia komunikacji został wytypowany standard Bluetooth Low Energy ze względu na niski poziom zużycia energii, szeroki zasięg, wysoką odporność na zakłócenia oraz prostą implementację wynikającą z szerokiej dostępności modułów komunikacyjnych wraz z oprogramowaniem ułatwiającym wdrożenie. Nie bez znaczenia pozostaje również fakt, że standard Bluetooth Low Energy jest obsługiwany przez większość komputerów i telefonów, co ułatwia przeprowadzenie testów i zwiększa potencjalną dostępność do projektowanego systemu, przykładowo w celu zmiany konfiguracji lub wyświetlenia wartości pomiarów. Jak wykazano w rozdziale przeglądowym Bluetooth w wersji o niskim zużyciu energii, spełnia wymagania odnośnie zasilania radiowego i baterijnego urządzeń, ponieważ pozwala znacznie zredukować zużycie energii, przez przesyłanie krótkich komunikatów pomiędzy urządzeniami, które pozostają przez większość czasu w stanie uśpienia i mogą przez ten czas magazynować energię pozyskaną z otoczenia. Standard BLE pozwala również na pracę w sieci wielu urządzeń, co jest jedną z najważniejszych wymaganych właściwości, która również została przetestowana. Jednym z kluczowych etapów w projekcie, był wybór odpowiedniego mikrokontrolera, obsługującego komunikację i pomiary. Ze względu na niskie zużycie energii, korzystne parametry techniczne i szeroką dokumentację został wybrany układ SoC (ang. *System on Chip*) nRF52840 firmy Nordic Semiconductors, z rdzeniem Cortex-M4F o taktowaniu 64MHz, posiadający 1 MB pamięci na program użytkownika i 256 KB pamięci operacyjnej. Do przeprowadzenia testów zostały wykorzystane zestawy rozwojowe z wytypowanym mikrokontrolerem. Został przygotowany program pozwalający na przesyłanie danych pomiarowych z ustaloną częstotliwością. Punktem startowym było oprogramowanie symulujące działanie portu szeregowego poprzez BLE, udostępniane przez producenta układu. Przygotowane oprogramowanie składa się z dwóch programów dla urządzenia centralnego, pełniącego funkcję bramy danych oraz peryferyjnego, które jest przeznaczone dla zaprojektowanego przetwornika pomiarowego. Oba programy wykorzystują pakiet oprogramowania układowego, udostępnianego przez producenta zwany „Soft device”,

służący do realizacji komunikacji w standardzie BLE. Pakiet musi zostać umieszczony w konkretnym obszarze pamięci obok programu napisanego przez użytkownika. Zarówno z poziomu programu dla urządzenia peryferyjnego jak i centralnego, jest dostęp do parametrów transmisji, istotnych podczas ustanowienia połączenia (list. 1).

```

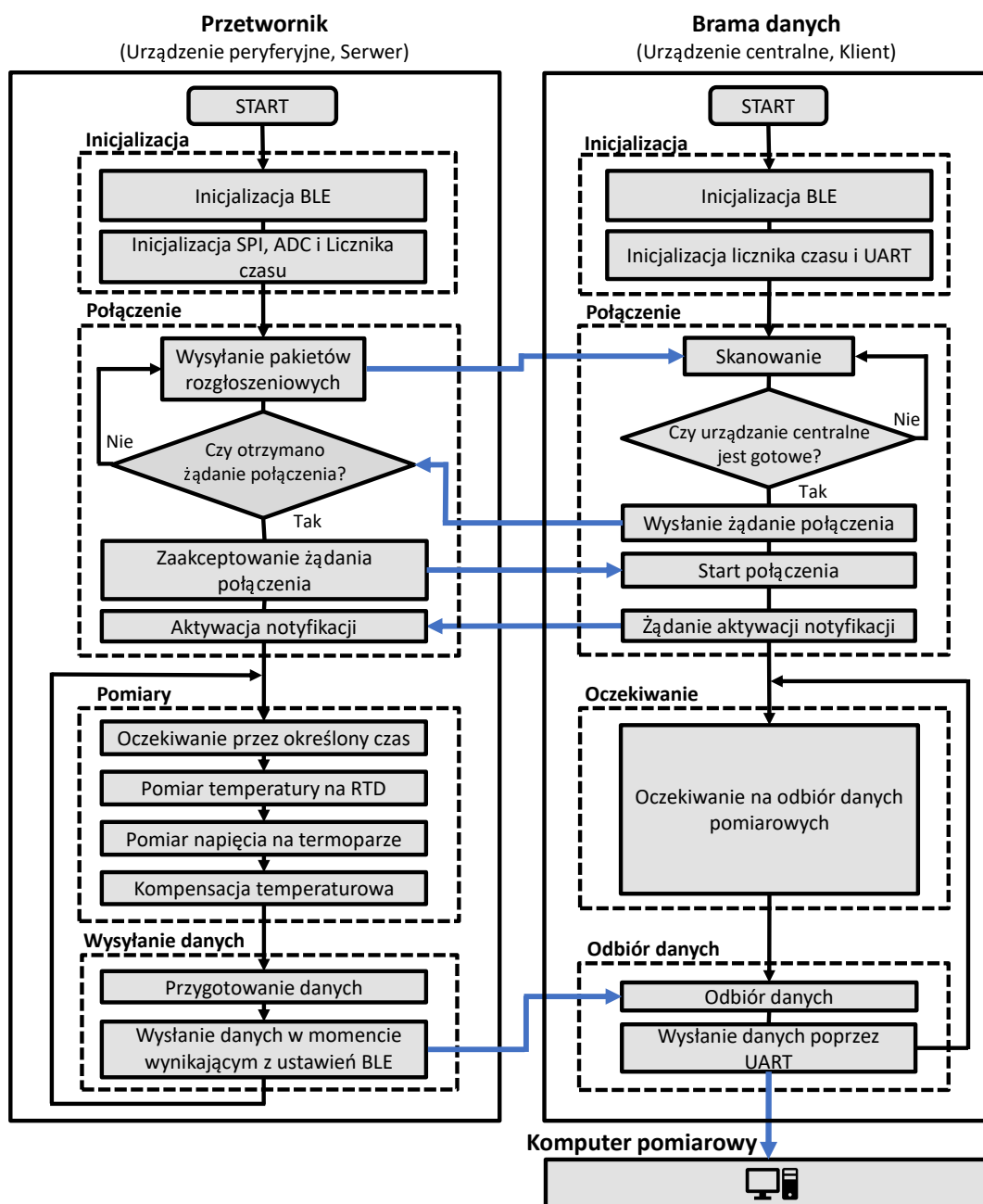
1 #define DEVICE_NAME "Smart_transducer"
2 #define NUS_SERVICE_UUID_TYPE BLE_UUID_TYPE_VENDOR_BEGIN
3 #define APP_BLE_OBSERVER_PRIO 3
4 #define APP_ADV_INTERVAL 64
5 #define APP_ADV_DURATION 18000
6 #define MIN_CONN_INTERVAL MSEC_TO_UNITS(475, UNIT_1_25)
7 #define MAX_CONN_INTERVAL MSEC_TO_UNITS(525, UNIT_1_25)
8 #define SLAVE_LATENCY 0
9 #define CONN_SUP_TIMEOUT MSEC_TO_UNITS(10000, UNIT_10)
10 #define FIRST_CONN_PARAMS_UPDATE_DELAY APP_TIMER_TICKS(50)
11 #define NEXT_CONN_PARAMS_UPDATE_DELAY APP_TIMER_TICKS(30)
12 #define MAX_CONN_PARAMS_UPDATE_COUNT 3

```

Listing 1. Część programu odpowiedzialna za ustawienie parametrów komunikacji

Obu urządzeniom zostają przypisane nazwy i typ identyfikatora (*DEVICE_NAME* i *NUS_SERVICE_UUID_TYPE*). Następnie zostają wskazane parametry fazy advertising dotyczące czasu i częstotliwości wysyłania pakietów rozgłoszeniowych (*APP_ADV_INTERVAL* i *APP_ADV_DURATION*) oraz dopuszczalny przedział czasu pomiędzy kolejnymi momentami wymiany danych (*MIN_CONN_INTERVAL* i *MAX_CONN_INTERVAL*). Zostaje również wskazana maksymalna liczba transferów danych, które może ominąć urządzenie peryferyjne bez ryzyka utraty połączenia np. gdy nie ma danych do przestania (*SLAVE_LATENCY*) oraz maksymalny czas, przez który urządzenie centralne będzie czekać na odpowiedź przed zerwaniem połączenia (*CONN_SUP_TIMEOUT*). Dalej ustawiane zostają zmienne związane z czasem i liczbą aktualizacji parametrów transmisji. Parametry transmisji są negocjowane pomiędzy urządzeniami. W kolejnym etapie inicjalizacyjnej części programu zostaje skonfigurowane połączenie poprzez SPI z przetwornikiem ADC, licznik czasu oraz serwer symulujący port szeregowy poprzez BLE. Dalsza struktura programu wynika z obsługi standardu protokołu BLE w sposób przedstawiony na rysunku 4.7. Po uruchomieniu urządzenie peryferyjne przesyła pakiety rozgłoszeniowe, a urządzenie centralne nasłuchuje, z czasem trwania i częstotliwością ustalonymi w podanych parametrach transmisji. Im dłuższe czasy trwania oczekiwania i wyższe częstotliwości rozgłaszania oraz skanowania, tym łatwiej nawiązać komunikację, jednak ma to negatywny wpływ na zużycie energii przez urządzenia. Z drugiej strony zbyt krótkie czasy oczekiwania i zbyt niskie częstotliwości mogą znacznie utrudnić lub uniemożliwić nawiązanie połączenia, ponieważ spada prawdopodobieństwo jednoczesnego wystąpienia przesyłania pakietów rozgłoszeniowych poprzez urządzenie peryferyjne i skanowania przez urządzenie centralne. W pierwszym etapie po odbiorze pakietu rozgłoszeniowego urządzenie

centralne przesyła żądanie komunikacji, na które urządzenie peryferyjne odpowiada informacją zwrotną, po czym połączenie zostaje nawiązane, a urządzenia zsynchronizowane. Przetwornik przyjmuje teraz rolę serwera danych, a centralny punkt sieci rolę klienta. Pakiety danych są przysyłane w formie notyfikacji, które nie wymagają informacji zwrotnych od odbiorcy, jednak muszą zostać wcześniej aktywowane. Moment wykonania pomiaru jest określony poprzez parametr określający czas liczony od ostatniej wymiany danych poprzez BLE. Dalsza część programu obsługuje pomiary oraz przygotowanie danych do wysłania. Dane przed wysyłką są formatowane do postaci pięciocyfrowego ciągu, gdzie dwie ostatnie cyfry odpowiadają za część ułamkową. Sposób przeprowadzenia pomiarów został dokładnie opisany w podrozdziale 4.1.5, a formatowanie danych w podrozdziale 4.5.2.



Rysunek 4.7. Schemat przedstawiający sposób działania programu przetwornika

4.1.5 Kontrola pracy układu ADC i obsługa czujników

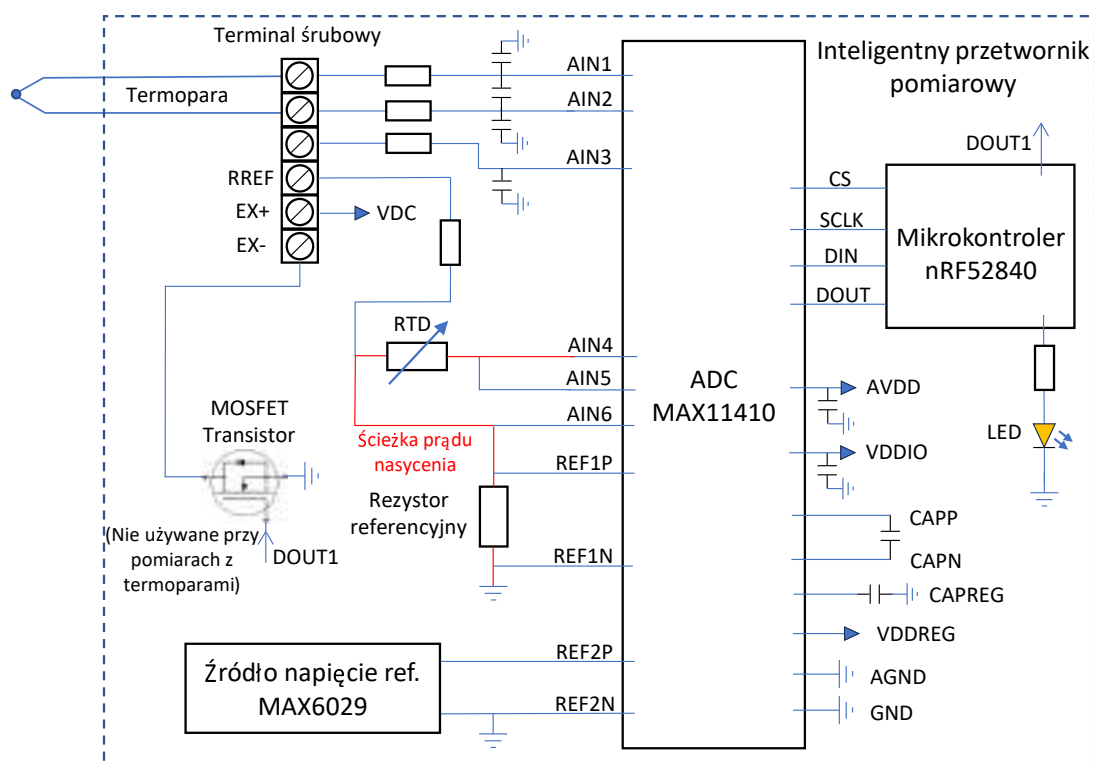
Został wytypowany układ MAX11410 produkowany przez firmę Maxim Integrated, ze względu na swoje szerokie możliwości, przy niskim zużyciu energii. Jest to wielokanałowy, 24-bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy typu Delta-Sigma specjalizowany pod kątem obsługi czujników, kontrolowany przez interfejs SPI (ang. *Serial Peripheral Interface*) i bardzo niskim zużyciu energii. Ze względu na brak dedykowanego oprogramowania do obsługi układu MAX11410 dla wybranej rodziny mikrokontrolerów, został przygotowany zestaw funkcji sterujących jego pracą i odczytujących dane pomiarowe. Komunikacja odbywa się poprzez interfejs szeregowy SPI, będący jednym z najpopularniejszych protokołów stosowanych do zapewnienia komunikacji pomiędzy mikrokontrolerami i układami peryferyjnymi. Program pomiarowy rozpoczyna funkcja *SPI_INIT()*, przypisująca wyprowadzenia mikrokontrolera do linii interfejsu i inicjalizująca interfejs SPI. Funkcja *SPI_Write1b (adress, command)* wysyła do przetwornika bajt danych i jednocześnie otrzymuje bajt zwrotny z układu. O tym czy dane mają być zapisane czy odczytane decyduje najstarszy bit dodany do przesyłanego parametru *adress*. Gdy występuje w tym miejscu wartość 1 następuje zapis do rejestru. Gdy występuje wartość 0 przesłana wartość jest ignorowana i następuje odczyt danych ze wskazanego rejestru. W ten sposób może być obsługiwane ponad 100 rejestrów przetwornika ADC odpowiedzialnych np. za rozpoczęcie i zakończenie pomiarów, typ pomiarów, filtrowanie sygnałów, wzmocnienie, wartość generowanego prądu itp. Rejestry mają 8, 16 lub 24 bity. Dane pomiarowe są zapisywane w rejestrze o długości 24 bitów, co wymaga przesłania bajtu adresu oraz trzech dowolnych bajtów w celu otrzymania trzech bajtów z wartością pomiaru. Poprzez wykorzystanie obsługi rejestrów zostały przygotowane funkcje *TC_pomiar*, *RTD_pomiar*, *SG_pomiar* i *V_pomiar*, służące odpowiednio do pomiarów z wykorzystaniem, czujników termoelektrycznych, czujników rezystancyjnych, tensometrów i czujników z wyjściem napięciowym. Na początku każdej z funkcji konfigurowane są rejestry przetwornika ADC w sposób odpowiedni dla danego typu realizowanego pomiaru (list. 2).

```
1 spi_write_1b(0x08,0x34);           //FILTER - ustawienia filtra
2 spi_write_1b(0x09,0b01000001);    //CTRL - ustawienia kanałów
3 spi_write_1b(0x0A,0b00000000);    //SOURCE 0x0A - wybór prądu
4 spi_write_1b(0x0B,0b00010000);    //MUX_CTRL0 - wybranie + i -
5 spi_write_1b(0x0C,0b01001111);    //MUX_CTRL1 - ustawienie prądu
6 spi_write_1b(0x0E,0b00000000);    //PGA - wzmocnienie
7 spi_write_1b(0x01,0b00000000);    //CONV_START - start pomiaru
```

Listing 2. Ustawienia rejestrów wykonywane dla funkcji *RTD_Pomiar*

Pomiar temperatury z wykorzystaniem termopar polega na pomiarze napięcia powstającego na skutek różnicy temperatur końca termopary ze spoiną łączącą dwa przewody z różnych materiałów i końca na którym wykonywany jest pomiar. W celu zmierzenia temperatury

obiektu, który jest w kontakcie ze spoiną pomiarową, konieczna jest informacja o temperaturze w miejscu pomiaru napięcia. Do tego celu wykorzystuje się zazwyczaj czujniki rezystancyjne. Układ MAX11410 pozwala na jednoczesną obsługę czujników rezystancyjnych i termopar (rys. 4.8). Obsługa rezystancyjnych czujników temperatury przy użyciu układu



Rysunek 4.8. Sposób obsługi termopar z kompensacją temperaturową przy pomocy czujnika RTD

MAX11410 jest realizowana przy wykorzystaniu rezystora referencyjnego o wysokiej precyzji. Układ MAX11410 posiada możliwość przełączania swoich dziesięciu wyprowadzeń w tryb pracy źródła prądowego, z regulacją w zakresie 10 μA - 1600 μA . Ten sam prąd płynie przez rezystor, który pełni rolę czujnika temperatury oraz rezystor referencyjny. Spadek napięcia mierzony na rezystorze referencyjnym pełni rolę napięcia odniesienia dla pomiaru napięcia na rezystorze, którego wartość jest poszukiwana. Zatem, ze stosunku napięć i znanej wartości rezystora referencyjnego można obliczyć szukaną wartość aktualnej rezystancji rezystora pomiarowego R_m . Następnie wartość temperatury T_{RTD} może zostać obliczona korzystając ze wzoru przybliżającego charakterystykę lub odczytana z tabeli dla danego typu czujnika. Do pomiaru temperatury PCB, w pobliżu złącza czujników, został użyty czujnik PT1000 (1000 Ω dla 0° C), którego temperatura jest obliczana ze wzoru 4.1.

$$T_{\text{RTD}} = \frac{-R_0 a + \sqrt{R_0^2 a^2 - 4R_0 b(R_0 - R_m)}}{2R_0 b} \quad (4.1)$$

gdzie: $R_0 = 1000$, $a = 3.9083 \times 10^{-3}$, and $b = -5.7750 \times 10^{-7}$.

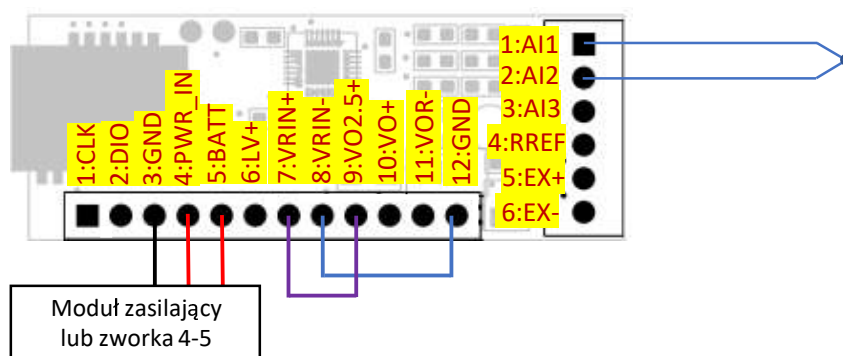
Pomiar temperatury uzyskany przy pomocy czujnika rezystancyjnego zainstalowanego w miejscu przyłączenia przewodów termopary do układu pomiarowego, jest wykorzystany do obliczenia napięcia E_r (dla termopary typu K) przy pomocy wielomianu 4.2. Równolegle wykonywany jest pomiar napięcia na wyprowadzeniach termopary w odniesieniu do referencyjnego źródła napięcia. Następnie obliczana jest suma uzyskanych napięć E_k , która przy pomocy wielomianu 4.3 jest użyta do obliczenia poszukiwanej temperatury T_k , w miejscu instalacji spiny pomiarowej termopary.

$$E_r = \sum_{i=0}^n C_i (T_{RTD})^i + \alpha_0 e^{\alpha_1 (T_{RTD} - 126.9686)^2} \quad (4.2)$$

$$T_k = c_0 + c_1 E_k + c_2 E_k^2 + \dots c_i E_k^i \quad (4.3)$$

gdzie: T_k - mierzona temperatura, E_r , E_k - napięcia, C_i , α_0 , α_1 i c_i - współczynniki

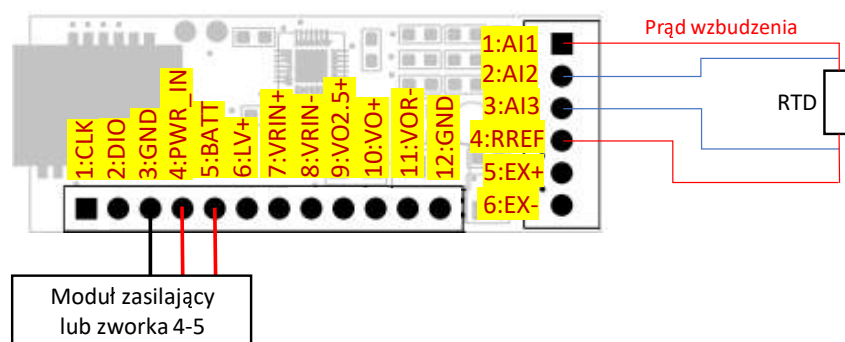
Każdy typ czujnika wymaga innej konfiguracji zworek ustawiających odpowiednie źródło napięcia referencyjnego i sposób zasilania. Przedstawione konfiguracje układu dla kolejnych typów czujników pomiarowych odpowiadają ustawieniom układu podczas testów obsługi czujników i optymalizacji zużycia energii opisanych w kolejnych rozdziałach. Dla termopary wejście napięcia referencyjnego układu MAX11410 zostaje podłączone do wyjścia układu MAX6029 generującego stabilne napięcie 2,5 V (rys. 4.9 - fioletowa i niebieska zworka). Taka konfiguracja zapewnia dokładny pomiar niskich napięć generowanych przez termopary. Układ może pracować na zasilaniu bateryjnym bez modułu zasilania poprzez zastosowanie zworki, jednak bateria może być wtedy eksploatowana tylko do 2,7 V, co wynika z minimalnego napięcia dopuszczalnego dla zasilania układów. Przy podłączeniu modułu zasilania zyskujemy stabilizację i podnoszenie napięcia do wartości 3,3 V oraz dostęp do zasilania bezprzewodowego.



Rysunek 4.9. Sposób podłączenia termopary

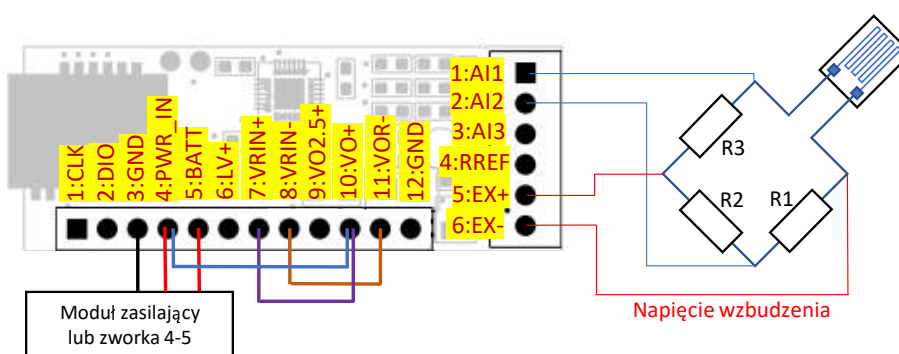
Zaprojektowany przetwornik pomiarowy pozwala na obsługę nie tylko wbudowanego czujnika PT1000, ale również zewnętrznych czujników rezystancyjnych. Referencyjne źródło napięcia w postaci układu MAX6029 nie jest wtedy wykorzystywane. Prąd generowany na jednym z wyprowadzeń układu przepływa przez czujnik i trafia na złącze RREF, które prowadzi do rezystora

referencyjnego. Napięcie na rezystorze jest referencyjne dla pomiaru napięcia na zewnętrznym czujniku, tak samo jak miało to miejsce dla czujnika zintegrowanego z modułem. Mogą zostać użyte czujniki trzyprzewodowe i czteroprzewodowe w celu podniesienia dokładności pomiarów. Poprowadzenie dodatkowych przewodów pozwala zredukować wpływ rezystancji przewodów pomiarowych (rys. 4.10).



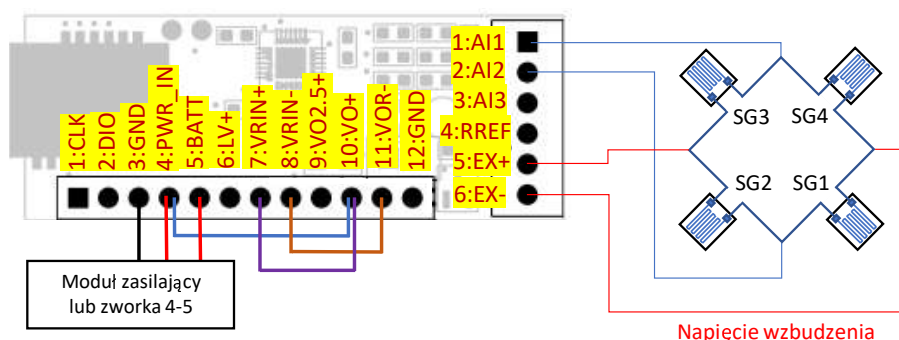
Rysunek 4.10. Sposób podłączenia czujnika RTD

Do pomiaru odkształceń badanych komponentów lotniczych wykorzystuje się najczęściej tensometry. Pod wpływem wydłużania i skracania ścieżek przewodzących zmienia się ich rezystancja. W przypadku użycia jednego tensometru istnieje możliwość podłączenia w sposób przedstawiony dla czujników rezystancyjnych i skorzystanie z rezystora referencyjnego lub wykorzystanie układu mostka tensometrycznego i skorzystanie z pomiaru napięcia na przekątnej mostka. Brakujące rezystory mostka mogą zostać zainstalowane przy przetworniku pomiarowym, poza obiektem testowym (rys. 4.11). W obu przypadkach układ byłby



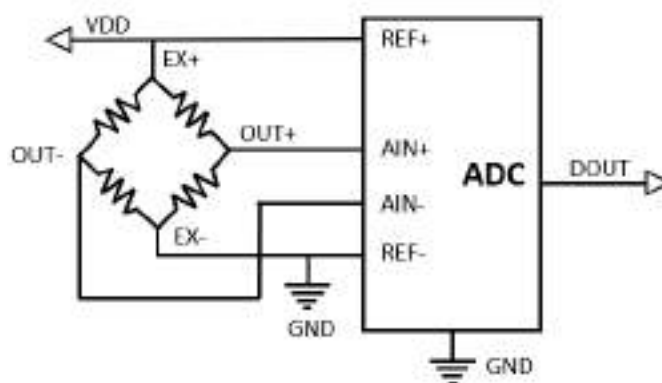
Rysunek 4.11. Podłączenie tensometru w układzie ćwierćmostka.

jednak bardzo podatny na zmiany rezystancji wynikające z wahań temperatury tensometru pomiarowego, związane z wygrzewaniem testowanego komponentu podczas badań. Żeby zredukować wpływ temperatury lub zwiększyć czułość układu stosuje się układy pół-mostka i pełnego mostka (rys. 4.12). Zwiększa się wtedy odpowiedź układu przez obciążenie kilku tensometrów lub wykorzystuje dodatkowe tensometry do kompensacji temperaturowej. W ogólnym przypadku tensometry są charakteryzowane przez współczynnik GF (ang. *Gauge Factor*) lub k (w polskich opracowaniach) będący stosunkiem relatywnej zmiany rezystancji



Rysunek 4.12. Podłączenie tensometru w układzie pełnego mostka

do zmiany odkształcenia. W celu obliczenia naprężenia należy skorzystać z prawa Hooke'a i znajomości stałych materiałowych badanego komponentu. Każdemu rodzajowi podłączenia odpowiadają oddzielne wzory na obliczenie odkształcenia będące kombinacją współczynnika GF, napięcia zmierzonego na przekątnej mostka oraz wartości liczbowych odpowiadających danej konfiguracji. Dla czujników wyposażonych w układ pełnego mostka np. dla czujników siły lub ciśnienia, podaje się sygnał w przeliczeniu na napięcie zasilania układu (np. 3 mV/V) przy nominalnym obciążeniu układu. Układ napięcia referencyjnego MAX6029, który jest używany do pomiarów termoelementów, mógłby również pełnić rolę napięcia odniesienia przy pomiarach z tensometrami, ale pomiary byłyby uzależnione od zmian poziomu napięcia wzbudzenia. Ponadto maksymalny prąd byłby zredukowany do 4mA (ze względu na specyfikację MAX6029). Dlatego, aby uzyskać wyższy dostępny prąd i podwyższyć dokładność pomiarów, korzystniej jest użyć napięcia wzbudzenia czujnika jako napięcia odniesienia dla ADC (rys. 4.13). W takiej konfiguracji pomiary będą niezależne od wahań zasilania, a dopuszczalna wartość prądu znacznie wyższa i zależna od sposobu zasilania układu. Źródło napięcia referencyjnego przetwornika ADC może zostać przełączone za pomocą zworek na zaprojektowanym układzie, w sposób przedstawiony wcześniej na rysunkach 4.11 i 4.12 (fioletowa i brązowa zworka). Zostaje wtedy wykorzystane napięcie za tranzystorem załączającym wyprowadzenie EX+. Taka konfiguracja zapewnia wysoką dokładność pomiarów, szczególnie w układzie gdzie napięcie zasilania spada wraz rozładowaniem baterii.



Rysunek 4.13. Tensometr w układzie pełnego mostka (napięcie zasilania jako referencja)

Zadaniem tranzystora jest cykliczne załączanie zasilania mostka, na czas wykonania pomiaru w celu ograniczenia średniego zużycia energii. Został wykorzystany tranzystor typu MOSFET sterowany polem elektrycznym, dzięki czemu może on być sterowany bezpośrednio poprzez jedno z wyprowadzeń mikrokontrolera, przy bardzo niskim poborze energii. Przy stałym zasilaniu prąd płynący przez tensometr byłby zbyt wysoki (tab. 4.1), co powodowałoby krótki czas pracy na zasilaniu bateryjnym lub znaczne ograniczenie możliwości zasilania bezprzewodowego. Zgodnie z prawem Ohma płynący prąd jest zależny od napięcia zasilania i rezystancji. Z punktu widzenia oszczędzania energii korzystnie jest zatem ograniczyć napięcie zasilania mostka i stosować tensometry o większej rezystancji. W celu umożliwienia zasilania układu poprzez tranzystor należy do wejścia VO+ podać napięcie bezpośrednio z wyprowadzenia PWR_IN (niebieska zworka na rysunkach 4.11 i 4.12). Mostek zostanie wtedy zasilony przez moduł zasilania bezprzewodowego lub bezpośrednio z baterii, gdy moduł nie jest wykorzystywany.

Nominalna rezystancja tensometru	1.8 V	3.3 V	10 V
120 Ω	15 mA	27,5 mA	83,3 mA
350 Ω	5,1 mA	9,4 mA	28,5 mA
1000 Ω	1,8 mA	3,3 mA	10 mA

Tabela 4.1. Pobór prądu, który odpowiadałby zasilaniu stałym napięciem i pracy ciągłej

Tensometry są wykorzystywane w wielu rodzajach czujników szeroko stosowanych w badaniach komponentów lotniczych do pomiaru siły, momentu siły i ciśnienia (rys. 4.14). Przedstawiony sposób obsługi mostków tensometrycznych pozwala na obsługę tego rodzaju czujników w wersjach bez zintegrowanego układu przetwarzania sygnału. Dla czujników ze zintegrowanym układem przetwarzania do postaci sygnału napięciowego, można zastosować konfigurację przedstawioną dalej.



(a) Czujnik siły



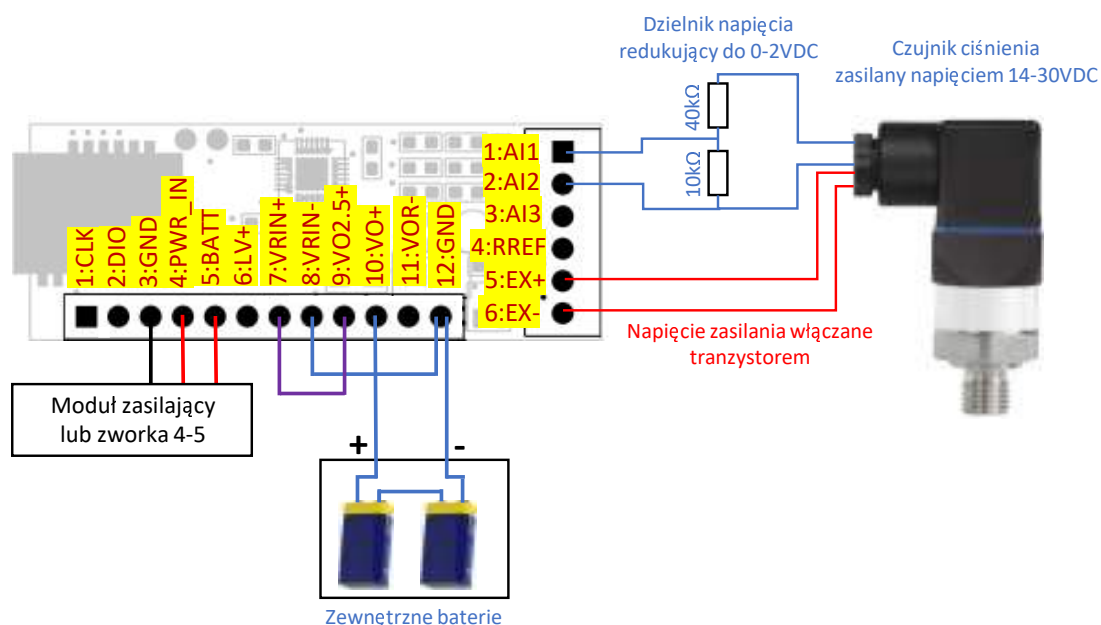
(b) Czujnik momentu siły



(c) Czujnik ciśnienia

Rysunek 4.14. Przykładowe czujniki z wyjściem tensometrycznym

Ten sam tranzystor, który jest wykorzystywany do pomiaru z tensometrami, może sterować zewnętrznym zasilaniem o napięciu do 30 V, co umożliwia współpracę z czujnikami zintegrowanymi m.in. czujnikiem ciśnienia z wymaganym napięciem zasilania w zakresie 14-30 V i wyjściem napięciowym. Do pracy z wyjściami napięciowymi powyżej 2,5 V (wartość maksymalna dla ADC) należy zastosować dzielnik napięcia. Możliwa jest również praca z wyjściami prądowymi poprzez pomiar spadku napięcia na dodatkowym rezystorze. Zasilanie czujnika poprzez zewnętrzną baterię wymaga jej podłączenia do wyprowadzeń VO+ i GND (rys. 4.15). Dla każdego czujnika obsługiwanego w ten sposób należy dobrać odpowiednią częstotliwość i czas załączania, zgodny z czasem stabilizacji pomiaru i przetwarzania go przez konkretny typ czujnika o wyjściu napięciowym.

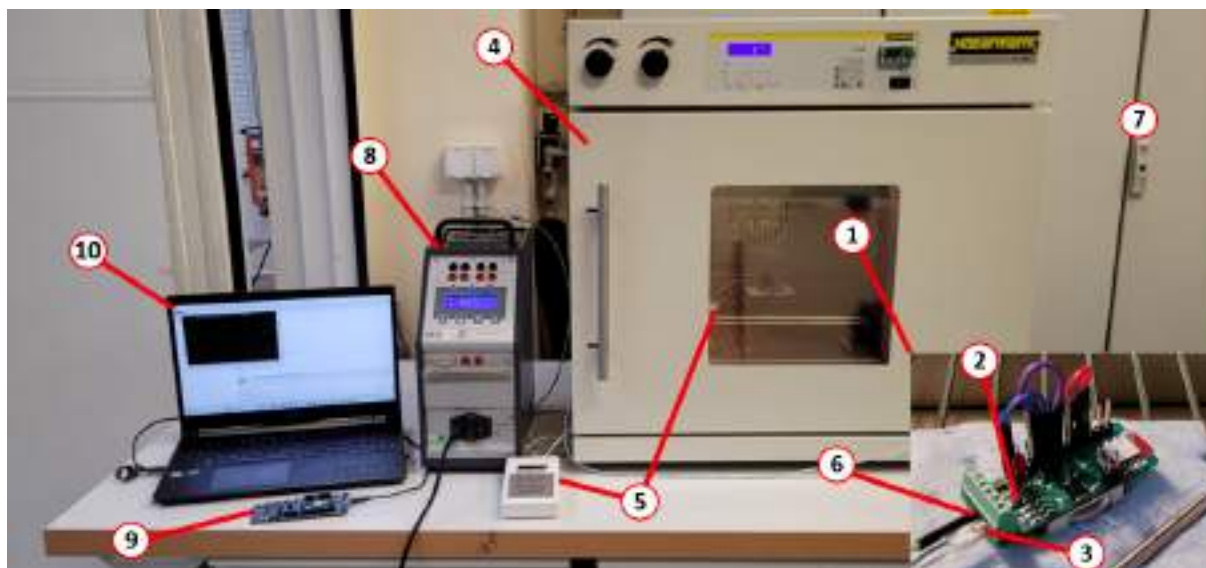


Rysunek 4.15. Współpraca układu z zewnętrznymi bateriami

Bateria o większej pojemności może również zastąpić baterię pastylkową zainstalowaną w złączu przetwornika i zostać wykorzystana w pomiarach z termoparami, czujnikami rezystancjami i tensometrami. Zastosowanie baterii o większej pojemności wymaga wtedy jednak wymiany złącza zasilającego zainstalowanego na dolnej warstwie płytki przetwornika lub podłączenia bezpośrednio do wyprowadzeń PWR_IN i GND. Projekt przetwornika umożliwia również zasilanie bezprzewodowe czujników przez zaprojektowany moduł zasilania, jednak w wielu przypadkach ilość dostępnej energii może nie być wystarczająca. W każdym z przypadków trzeba dopasować sposób zasilania do wymagań i możliwości danej aplikacji. Badania możliwości zasilania baterijnego i bezprzewodowego zostaną przedstawione w podrozdziale 4.1.7, po potwierdzeniu działania funkcji pomiarowych układu w podrozdziale 4.1.6.

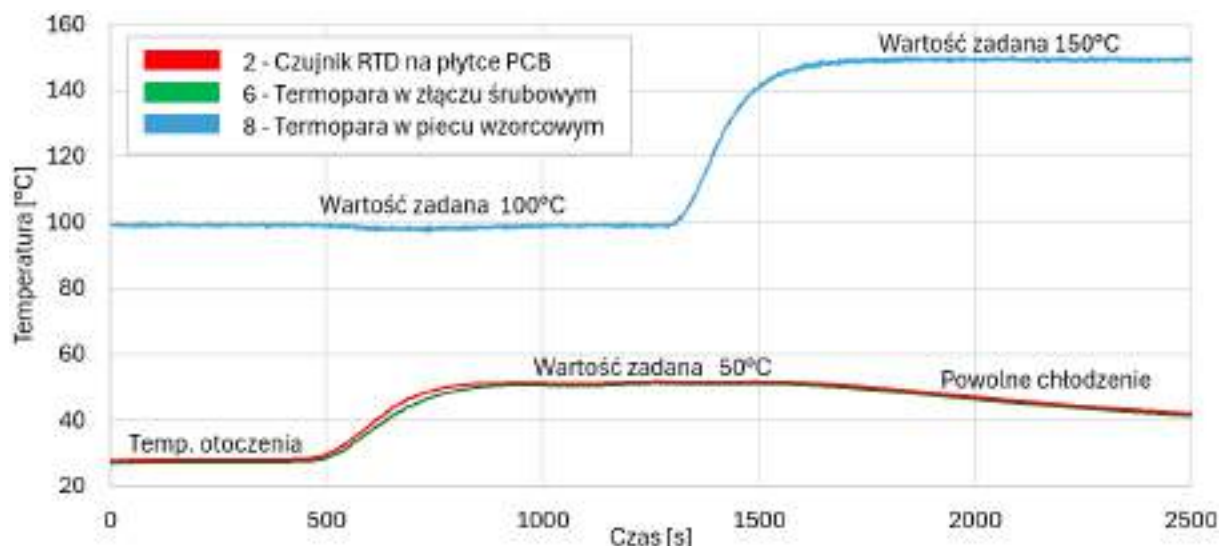
4.1.6 Badania funkcji pomiarowych układu

Działanie każdej z funkcji przetwornika zostało potwierdzone w serii testów wykonanych na przygotowanych stanowiskach testowych, w sposób opisany poniżej. Testowane konfiguracje przetwornika odpowiadają tym przedstawionym na schematach w poprzednim rozdziale. Obsługa zaplanowanych typów czujników została potwierdzona przy wykorzystaniu wzorców mierzonych wartości. Pierwszy test polegał na potwierdzeniu poprawnego działania kompensacji temperaturowej (rys. 4.16). Przetwornik (1), ze zintegrowanym czujnikiem RTD (2) i termoparą podłączoną do złącza pomiarowego (3), został umieszczony w piecu (4). Temperatura wewnątrz pieca była mierzona za pomocą referencyjnego czujnika temperatury ze wskaźnikiem (5) i termopary (6) umieszczonej wewnątrz terminala śrubowego (w celu pomiaru temperatury złącza śrubowego) i podłączonej do głównego systemu pomiarowego (7) stanowiska testowego. Spoina pomiarowa termopary podłączonej do wejścia pomiarowego przetwornika została umieszczona w precyzyjnym piecu kalibracyjnym (8). Przedstawiona konfiguracja pozwoliła na zmianę temperatury obu końców termopary i dokładne wiarygodne odwzorowanie warunków, które mogą wystąpić podczas rzeczywistych testów w laboratoriach testujących komponenty lotnicze. Dane podczas badania były odbierane przez moduł rozwojowy układu nRF52840 (9), podłączony do komputera (10). Przetwornik był testowany w temperaturach z zakresu 25-60°C, podczas gdy temperatura w piecu kalibracyjnym z termoparą zmieniała się w zakresie 25-300°C. W jednym z testów, którego wyniki



Rysunek 4.16. Stanowisko testowe przygotowane do badania obsługi czujników temperatury

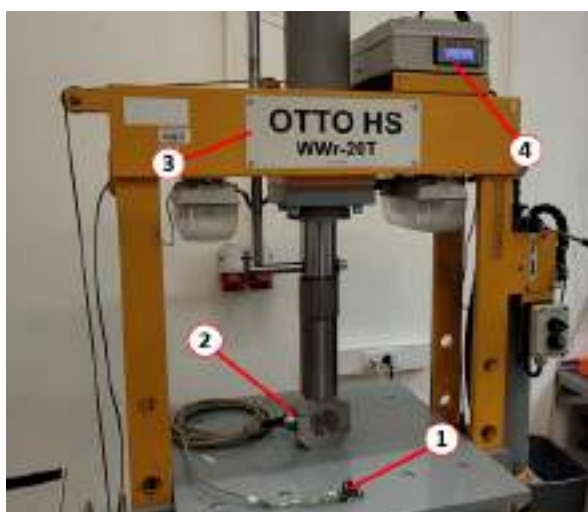
zostały przedstawione na rysunku 4.17, temperatura w piecu z przetwornikiem zmieniała się od temperatury otoczenia do 50°C, kiedy temperatura w piecu referencyjnym ze spoiną pomiarową była ustawiona na 100°C. Następnie wartość zadana dla pieca kalibracyjnego została zmieniona na 150°C, a piec został ustawiony na powolne wychładzanie. Dokładny odczyt temperatur dla obu wartości zadanych dla pieca kalibracyjnego (100°C i 150°C)



Rysunek 4.17. Wyniki testu obsługi termopary z kompensacją poprzez czujnik PT1000

potwierdza prawidłową obsługę pomiaru przy pomocy termopary, a tym samym prawidłową obsługę kompensacji temperaturowej poprzez rezystancyjny czujnik PT1000. Podobne testy z wykorzystaniem pieca kalibracyjnego, zostały wykonane dla zewnętrznych czujników rezystancyjnych podłączonych do złącza pomiarowego przetwornika. Przeprowadzone badania wykazały wysoką dokładność pomiarową. W żadnym z testów błędy nie przekraczały 1°C , co było przyjętym warunkiem pozytywnego zakończenia testów obsługi czujników temperatury.

Obsługa tensometrów została potwierdzona w dwóch badaniach. W pierwszym teście przetwornik (1) został podłączony do czujnika tensometrycznego (2) naciskanego przez prasę (3) ze wskaźnikiem (4), jak pokazano na rysunku 4.18a. W drugim teście sprawdzano współpracę przetwornika z wagą wykorzystującą mostek tensometryczny. Tak jak przedstawiono na rysunku 4.18b, wskazania wagi podłączonej do przetwornika były porównywane z wagą



(a) Test z wykorzystaniem prasy



(b) Test wykorzystaniem precyzyjnej wagi

Rysunek 4.18. Testy obsługi czujników wykorzystujących mostki tensometryczne

o wysokiej dokładności. W obu przypadkach wejście napięcia odniesienia dla przetwornika ADC zostało podłączone do napięcia wzbudzenia mostka tensometrycznego. Testy potwierdziły funkcjonalność i wysoką dokładność pomiaru, porównywalną ze wskaźnikami wzorcowymi.

Ostatnią testowaną grupę stanowią czujniki z wyjściem napięciowym. W celu sprawdzenia tej funkcji przetwornik (1) z podłączonym czujnikiem ciśnienia z wyjściem napięciowym (2), został podłączony do układu kalibracji ciśnienia z precyzyjną pompką (3), i precyzyjnym miernikiem ciśnienia (4), jak pokazano na rysunku 4.19. Układ zasilany był z dwóch baterii o napięciu 9 V (5) połączonych szeregowo, aby uzyskać napięcie zasilania czujnika 18 V oraz jednej baterii CR2032 (6) do zasilania przetwornika. Zasilanie czujnika z zewnętrznych baterii było włączane cyklicznie za pomocą tranzystora. Czas potrzebny na wykonanie pomiaru został dobrany doświadczalnie i ustalony na 65 ms. Sygnał wyjściowy czujnika został zredukowany przez dzielnik napięcia z zakresu 0-10 V do zakresu 0-2 V. Przeprowadzone serie testów wykazują funkcjonalność przetwornika i wysoką dokładność na poziomie $\pm 0,05$ bar, dla testowanego czujnika o zakresie 0-10 bar. Przygotowane układy pomiarowe były punktem wyjścia do rozpoczęcia optymalizacji zużycia energii przedstawionej, w kolejnym podrozdziale.



Rysunek 4.19. Test obsługi czujnika ciśnienia z wyjściem napięciowym

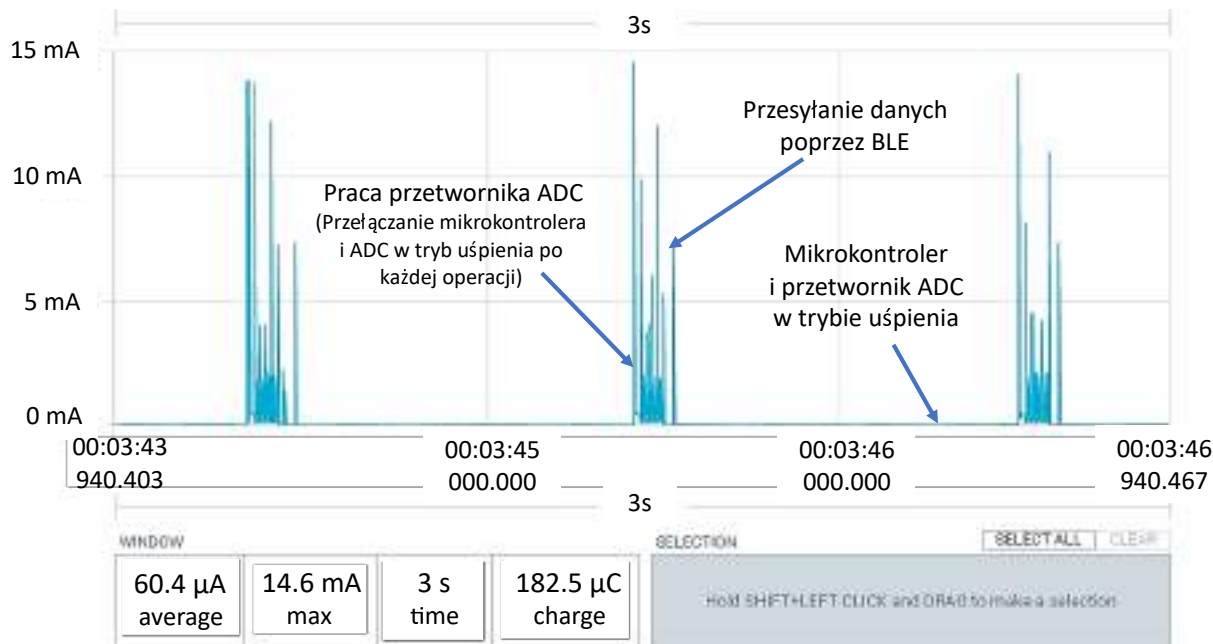
4.1.7 Optymalizacja zużycia energii

Zużycie energii w bezprzewodowych urządzeniach dedykowanych IoT, jest jednym z najważniejszych parametrów urządzeń, określającym spektrum zastosowań. Jest ono silnie zależne od ustawień parametrów komunikacji i parametrów pomiarowych. Wraz ze wzrostem częstotliwości pomiarowych i skróceniem czasu pomiędzy kolejnymi przesłanymi pakietami danych wzrasta zużycie energii, ponieważ urządzenie krócej znajduje się w trybie oszczędzania energii. W celu łatwego porównania zużycia energii pomiędzy różnymi konfiguracjami systemu

został wykorzystany układ Power Profile Kit II, który może być użyty jako regulowany zasilacz z precyzyjnym pomiarem prądu lub zostać wpięty szeregowo w tor zasilania i działać jak precyzyjny amperomierz. W przeprowadzonych testach moduł pracował jako precyzyjny amperomierz w sposób przedstawiony na rysunku 4.20, przebieg prądu był obserwowany w dedykowanej aplikacji 4.21 udostępnianej przez Nordic Semiconductors. Zgodnie z założeniami zostały zbadane wymagania częstotliwości pomiarowych z zakresu 0,1-2 Hz dla różnych konfiguracji układu przedstawionych we wcześniejszych podrozdziałach. System zmniejsza zużycie



Rysunek 4.20. Stanowisko do testów zużycia energii



Rysunek 4.21. Zużycie energii podczas obsługi rezystancyjnego czujnika PT1000

energii poprzez przełączanie ADC i mikrokontrolera w tryb uśpienia pomiędzy operacjami. W obliczeniach przyjęto 85 % czasu pracy wynikającego z pojemności baterii CR2032, ponieważ napięcie tego ogniwa przed całkowitym rozładowaniem spada poniżej 2,7 V, co jest dolnym limitem dla napięcia zasilania zaprojektowanego przetwornika. Wyniki optymalizacji oraz

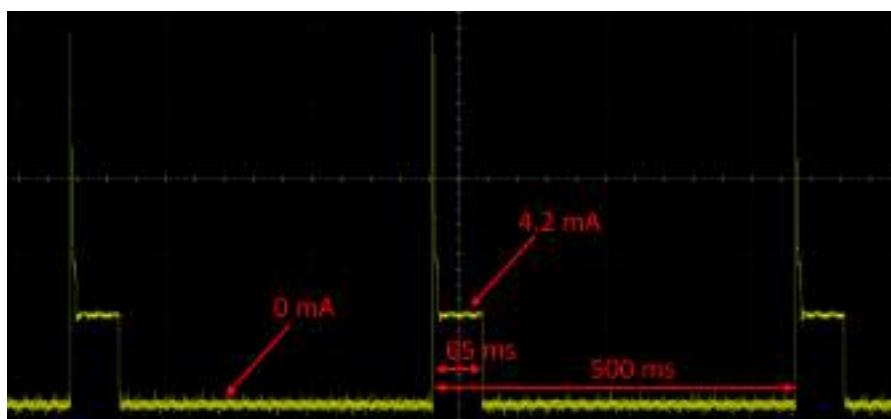
szacunkowy czas pracy akumulatora dla termopary, czujnika rezystancyjnego oraz tensometru przedstawiono w tabeli 4.2. Obliczenia nie uwzględniają efektu samorozładowania i pokazują jedynie przybliżony czas pracy przetwornika, w oparciu o pojemność akumulatorów i aktualny efekt optymalizacji zużycia energii przetwornika. W obu testowanych sposobach pomiaru

Częstotliwość	PT1000		Termopara		Mostek tens.	
	Średni prąd	Czas	Średni prąd	Czas	Średni prąd	Czas
Hz	μA	doby	μA	doby	μA	doby
0,1	18	453	23	354	38	214
0,2	22	370	36	226	62	131
0,5	38	214	66	123	163	50
1	60	136	118	69	197	41
2	114	71	236	35	480	17

Tabela 4.2. Pobór prądu i szacowany czas pracy przetwornika zasilanego baterią CR2032

temperatury układ generuje prąd wzbudzenia o natężeniu 50 μA . Zużycie energii jest wyższe w przypadku termopary, ponieważ system musi mierzyć napięcie na termoparze i temperaturę wbudowanego czujnika RTD w celu kompensacji, co powoduje dłuższą pracę poza trybem uśpienia. Zmniejszenie częstotliwości pomiarów temperatury kompensacyjnej może zredukować zużycie energii, ale zmniejszy również dokładność pomiaru, gdy system pracuje w środowisku o zmiennej temperaturze. Napięcie wzbudzenia mostka ($4 \times 1000 \Omega$) włączane było za pomocą tranzystora, co umożliwia osiągnięcie przez układ niskiego zużycia energii.

Przeprowadzone badania pokazują także możliwości współpracy ze zintegrowanymi czujnikami z wyjściem napięciowym z dwoma niezależnymi źródłami zasilania przetwornika i czujnika. Jak zostało to przedstawione wcześniej, zasilanie czujnika było włączane poprzez wbudowany tranzystor. Do pomiaru prądu przetwornika wykorzystano zestaw Power Profiler Kit, a do pomiaru prądu czujnika ciśnienia wykorzystano pomiar napięcia na dodatkowym rezystorze zamontowanym szeregowo, jak przedstawiono na rysunku 4.22. Za pomocą



Rysunek 4.22. Przebieg prądu czujnika zarejestrowany dla częstotliwości 2 Hz

oscylloskopu rejestrowano przebieg napięcia na rezystorze wpiętym szeregowo z czujnikiem i przeliczano go na wartość prądu zgodnie z prawem Ohma. Średni prąd w ciągu 65 ms pracy wynosi 4,8 mA. Pobór prądu czujnika jest większy natychmiast po włączeniu zasilania. Prawdopodobnie jest to efekt ładowania kondensatorów i stabilizacji napięcia. Pobór prądu w pracy ciągłej wynosi 4,2 mA. Czujnik jest załączany tylko na 65 ms, zatem pobór prądu zmienia się wraz z częstotliwością załączeń, co przedstawiono w tabeli 4.3.

	Zasilanie przetwornika CR2032 230 mAh		Zasilanie czujnika - dwie baterie 6LR61 9V, 550 mAh	
Częstotliwość	Średni prąd	Czas	Średni prąd	Czas
Hz	μA	doby	μA	doby
0,1	15	543	31	734
0,2	19	429	62	367
0,5	30	271	156	146
1	47	173	312	73
2	92	89	624	36

Tabela 4.3. Pobór prądu i szacowany czas pracy przy zasilaniu czujnika przez dwie baterie 6LR61

4.1.8 Badanie radiowego zasilania bezprzewodowego

System był testowany również z zaprojektowanym modułem zasilania bezprzewodowego. Rysunek 4.25 przedstawia przygotowaną konfigurację testową. Pierwszy etap testów został wykonany bez użycia akumulatora, wyłącznie z wykorzystaniem zasilania poprzez nadajnik zasilający. Odległość pomiędzy nadajnikiem a przetwornikiem z zainstalowanym modułem była powoli zwiększana, aż do utraty połączenia BLE. Taka operacja została przeprowadzona dla rezystancyjnego czujnika temperatury, termopary i wagi wykorzystującej mostek tensometryczny przy różnych częstotliwościach pomiarowych z zakresu 0,1-2 Hz. Zasięg zasilania bezprzewodowego zmniejsza się wraz ze wzrostem



Rysunek 4.23. Stanowisko przygotowane do badania zasilania bezprzewodowego

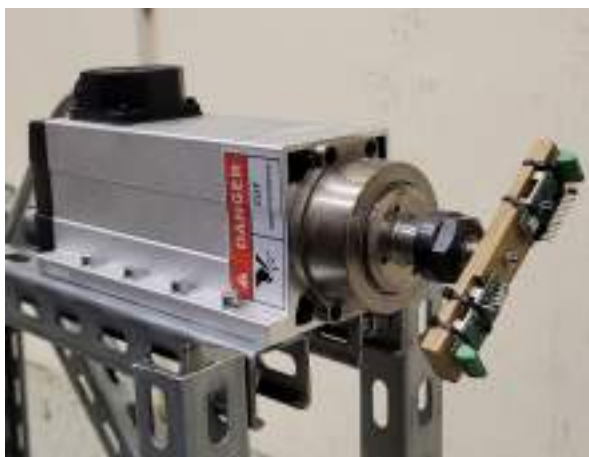
Częstotliwość [Hz]	Zasięg zasilania bezprzewodowego [cm]		
	RTD PT1000	Termopara	Mostek tensom.
0,1	115	64	62
0,2	102	59	57
0,5	83	54	50
1	73	48	42
2	62	43	30

Tabela 4.4. Wyniki testu radiowego zasilania bezprzewodowego

częstotliwości pomiarowej, ponieważ przy wyższych częstotliwościach nie ma wystarczającego czasu na ładowanie kondensatorów, co przedstawiono w tabeli 4.4. Zależność pomiędzy poborem energii przetwornika (pokazana w tabeli 4.2), a zasięgiem zasilania bezprzewodowego nie jest oczywista do zinterpretowania. Pobór energii z modułem zasilania bezprzewodowego jest wyższy niż przy pracy z samym akumulatorem, ze względu na konwersję napięcia i upływ prądu w kondensatorach. Co więcej, wydajność konwersji zmienia się wraz z napięciem i prądem. Średni prąd jest istotnym czynnikiem zużycia energii, ale ważny jest także czas pracy poza trybem uśpienia i maksymalna wartość szczytowa prądu. Na przykład krótki, duży wzrost prądu może rozładować kondensatory, nawet jeśli średni prąd jest niski. Kolejne testy przeprowadzono z zamontowaną baterią. Poza strefą pełnego działania zasilania bezprzewodowego przetwornik wykorzystuje częściowo źródło RF i akumulator. W każdym cyklu przełącza się z kondensatorów na akumulator, gdy kondensatory są rozładowane. Stopień użycia zasilania bezprzewodowego maleje wraz ze wzrostem odległości, aż system zaczyna korzystać wyłącznie z baterii. Uzyskane wyniki zmieniłyby się przy zmianie orientacji względem anteny nadawczej, zmianie typu anteny odbiorczej, zmianie liczby i typu kondensatorów lub zmianie parametrów programu. Zatem uzyskane wyniki przedstawiają wyłącznie możliwości danej konfiguracji i mogą być jeszcze w przyszłości optymalizowane.

4.1.9 Badania systemu na stanowisku testowania komponentów

W końcowej fazie badań zaprojektowany przetwornik został przetestowany w pomieszczeniu badań w Laboratorium Badania Łożysk. Na wale silnika sterowanego poprzez przemiennik częstotliwości, został zainstalowany element z dwoma przetwornikami. Konfiguracja przedstawiona na rysunku 4.32a pozwoliła na sprawdzenie komunikacji, zasilania baterijnego i zasilania bezprzewodowego podczas ruchu obrotowego. Badanie przeprowadzono do 5000 obr./min, po przeprowadzeniu zgrubnego wyważenia wirnika. Taki zakres prędkości może być już wystarczający do badań śmigieł. Podczas testów była transmitowana temperatura zmierzona przez zintegrowany z przetwornikiem, rezystancyjny czujnik temperatury typu PT1000. Poza dwoma obracającymi się przetwornikami w różnych miejscach pomieszczenia testowego (6,5 x 6 m) umieszczono pięć przetworników. Wszystkie urządzenia komunikowały się z komputerem umieszczonym na biurku w pomieszczeniu sterownia, jak pokazano na rysunku 4.32b, gdzie



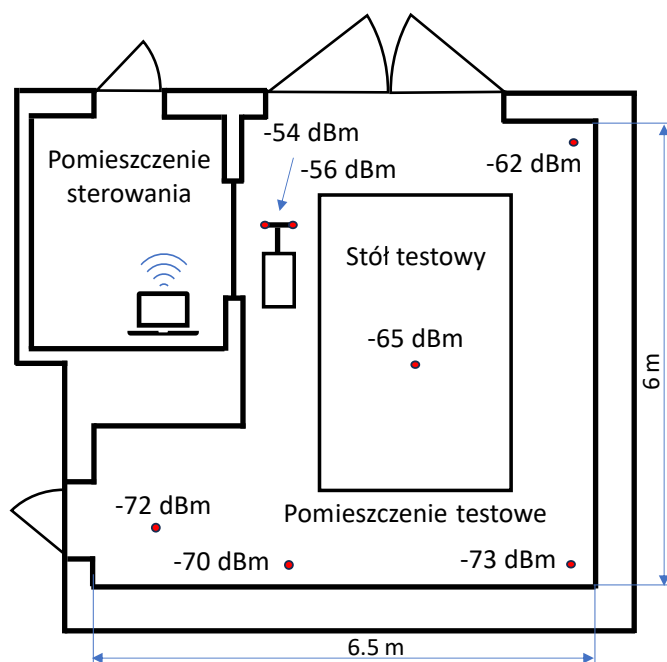
(a) Test obracających się przetworników



(b) Pomieszczenie sterowania

Rysunek 4.24. Badania przetworników w pomieszczeniu prowadzenia testów

operator pracuje podczas testu. Komputer komunikował się poprzez moduł BLE i aplikację udostępnianą przez firmę Nordic Semiconductors. Pomiary wykonano z częstotliwością 1 Hz. Najpierw testowano układ wyłącznie przy zasilaniu bateryjnym, a następnie podłączono zaprojektowany moduł rozszerzający, umożliwiający zasilanie bezprzewodowe. Testy wykazały, że system działał podczas obrotów bez widocznych zmian w dokładności pomiarów. Była możliwa komunikacja z dwoma obracającymi się przetwornikami oraz pięcioma pozostałymi przetwornikami umieszczonymi w pomieszczeniu testowym. Urządzenia komunikowały się z komputerem poprzez ścianę z podwójną szybą kuloodporną. Moduły obrotowe można było zasilać bezprzewodowo z odległości 0,35 m. Na rysunku 4.25 przedstawiono umieszczenie przetworników w pomieszczeniu testowym podczas testu oraz odpowiadające im wskaźniki



Rysunek 4.25. Wskaźniki RSSI odpowiadające przetwornikom w pomieszczeniu testowym

RSSI (ang. Received Signal Strength Indication), odczytane na komputerze w pomieszczeniu sterowania. Pomiary zostały przeprowadzone z wykorzystaniem oprogramowania udostępnianego przez Nordic Semiconductors. Komunikacja była możliwa w każdym zbadanym punkcie pomieszczenia testowego, nawet w najbardziej odległym położeniu od komputera z modułem komunikacyjnym. Pomiary RSSI reprezentują względną jakość odbieranego sygnału, której pomiar może różnić się pomiędzy producentami urządzeń. Uzyskane wartości w zakresie pomiędzy -54 dBm a -73 dBm, świadczą o dobrym poziomie siły sygnału przy danej konfiguracji sprzętowej. Test potwierdził funkcjonalność w sieci gwiazdowej siedmiu przetworników, ale nie jest to ograniczenie systemu. Zgodnie z notą katalogową układu nRF52840 i dokumentacją wybranego oprogramowania układowego (S140), powinno być możliwe zbudowanie sieci w strukturze gwiazdy składającej się z dwudziestu urządzeń. Taka liczba urządzeń nie jest jednak obsługiwana przez wiele urządzeń obsługujących standard Bluetooth Low Energy np. znaczną część komputerów z wbudowanym modułem Bluetooth. Wraz ze zwiększeniem liczby obsługiwanych urządzeń zwiększa się obciążenie pamięci układu obsługującego transmisję bezprzewodową i z tego względu maksymalna liczba urządzeń jest często ograniczana.

4.1.10 Podsumowanie

Został zaprojektowany uniwersalny bezprzewodowy przetwornik pomiarowy o zasilaniu baterijnym z opcjonalnym zasilaniem radiowo-baterijnym. Przetwornik umożliwia wykonywanie pomiarów z najczęściej stosowanymi czujnikami takimi jak termoelektryczne i rezystancyjne czujniki temperatury, czujniki ciśnienia, tensometry i inne czujniki z wyjściem napięciowym. Może on pracować przez miesiące przy zasilaniu z niewielkiej baterii pastylkowej lub być zasilany drogą radiową z odległości kilkudziesięciu centymetrów. Jest to wynikiem tego, że dobór elementów elektronicznych, wybór metody komunikacji i zrealizowany sposób wykonania pomiarów były ukierunkowane na jak najniższe zużycie energii. Obecnie na rynku nie ma bezprzewodowych przetworników pomiarowych, dedykowanych zastosowaniu w laboratoriach, o tak niskim zużyciu energii. Prawidłowe działanie wszystkich funkcji urządzenia zostało potwierdzone podczas testów wykonanych na przygotowanych stanowiskach badawczych oraz w pomieszczeniu prowadzenia testów. Zaproponowane rozwiązanie może znaleźć zastosowanie w badaniach, w których nie jest istotne wykonywanie pomiarów z wysoką częstotliwością. Można tą metodą wprowadzać do systemu nowe kanały pomiarowe w prostszy sposób, bez konieczności prowadzenia przewodów. Bezprzewodowe wykonywanie pomiarów zmienia również warunki kontynuacji badań w kolejnych laboratoriach. Przetworniki zainstalowane na obiekcie testowym mogą automatycznie skomunikować się z systemem pomiarowym laboratorium i przekazywać wyniki pomiarów w postaci cyfrowej poprzez połączenie radiowe. Wzorcowanie toru pomiarowego również znacznie się upraszcza, ponieważ można wykonać wzorcowanie czujnika wraz z przetwornikiem i taki komplet używać na różnych stanowiskach badawczych, bez wpływu różnicy kart pomiarowych w poszczególnych systemach.

4.2 Inteligentny bezprzewodowy przetwornik temperatury dedykowany testom wysokoobrotowych komponentów wirujących

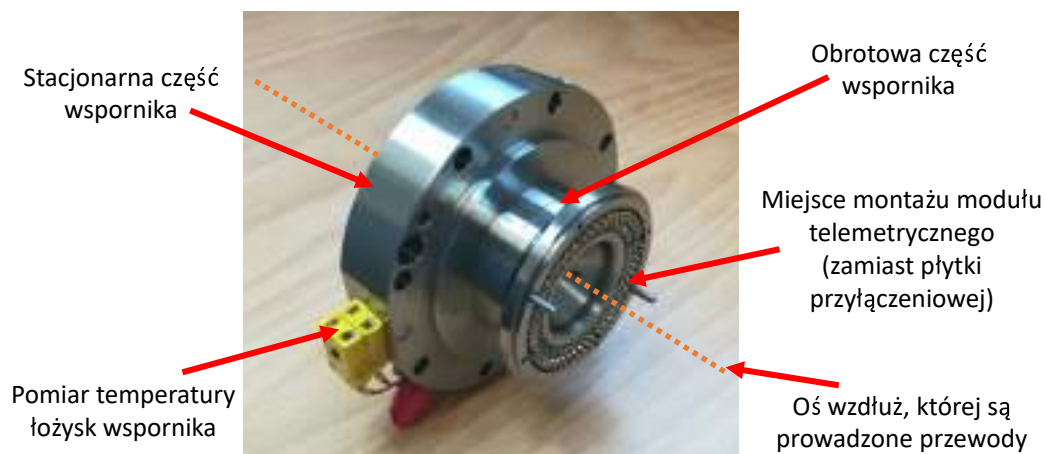
Rozdział stanowi udokumentowanie prac projektowo-badawczych, prowadzących do skonstruowania wielokanałowego inteligentnego przetwornika dedykowanego pomiarom temperatur, podczas testów obrotowych komponentów lotniczych np. łożysk.

4.2.1 Założenia projektowe

Jedną z najbardziej interesujących, a zarazem problematycznych, kwestii podczas testów komponentów lotniczych jest pomiar parametrów mierzonych przez instrumentację obracającą się wraz z testowanymi obiektami badawczymi. Obecne na rynku rozwiązania często nie spełniają wymagań testów pod względem wymiarów, funkcjonalności, zużycia energii i kosztu wdrożenia. Obserwowany w ciągu ostatnich lat postęp technologiczny związany z koncepcją Internetu Rzeczy, doprowadził do znacznego rozwoju w zakresie komunikacji bezprzewodowej, miniaturyzacji podzespołów elektronicznych oraz energooszczędności urządzeń. Możliwe stało się skonstruowanie inteligentnego obrotowego modułu telemetrycznego, spełniającego wymagania testów komponentów lotniczych, przy zachowaniu niskich kosztów projektu. Na podstawie przeglądu wiedzy i analizy wymagań testów obrotowych, przeprowadzanych w laboratoriach lotniczych, zostały przygotowane założenia projektowe zestawione poniżej:

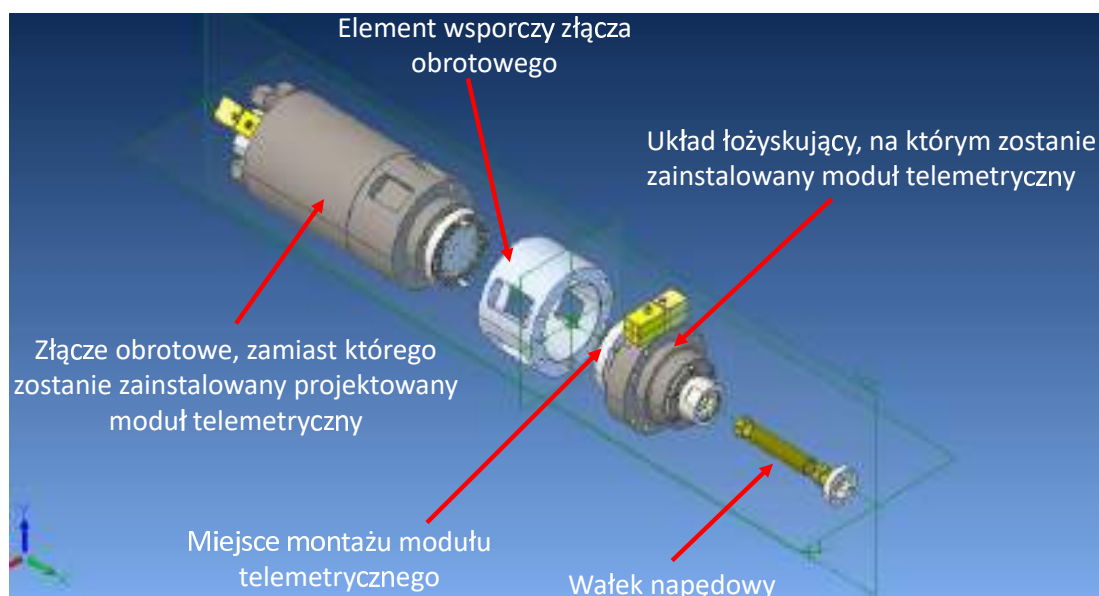
- możliwość pracy przy prędkościach do 20000 obr./min;
- niska waga i łatwe wyważanie w celu zmniejszenia sił działających na układ;
- montaż elementów zapewniający wysoką odporność na siły odśrodkowe towarzyszące wysokim prędkościom obrotowym;
- współpraca z termoelektrycznymi i rezystancyjnymi czujnikami temperatury;
- źródło zasilania musi mieć możliwość pracy bez zakłóceń przez lata, co wynika z potrzeby obsługi testów długoterminowych;
- zredukowane zużycie energii mające wpływ na zasięg zasilania bezprzewodowego;
- niski koszt zwiększający dostępność modułu telemetrycznego;
- komunikacja bezprzewodowa w standardzie BLE.

Oprócz ogólnej oceny możliwości w zakresie budowy wysokobrotowych modułów telemetrycznych, jednym z głównych celów prac było zaprojektowanie przetwornika obrotowego w sposób pozwalający na łatwe wdrożenie w Laboratorium Badania Łożysk zlokalizowanym w Sieci Badawczej Łukasiewicz - Instytucie Lotnictwa. Jednym z wymagań było ograniczenie konieczności zmian w dostępnej infrastrukturze stanowisk badawczych. Aktualnie do przesyłania sygnałów z czujników, które wirują wraz z testowanym komponentem wykorzystuje się złącze obrotowe o stu kontaktach. Gdy złącze obrotowe jest odłączone od wspornika,



Rysunek 4.26. Wspornik obrotowy, na którym zostanie zainstalowany przetwornik

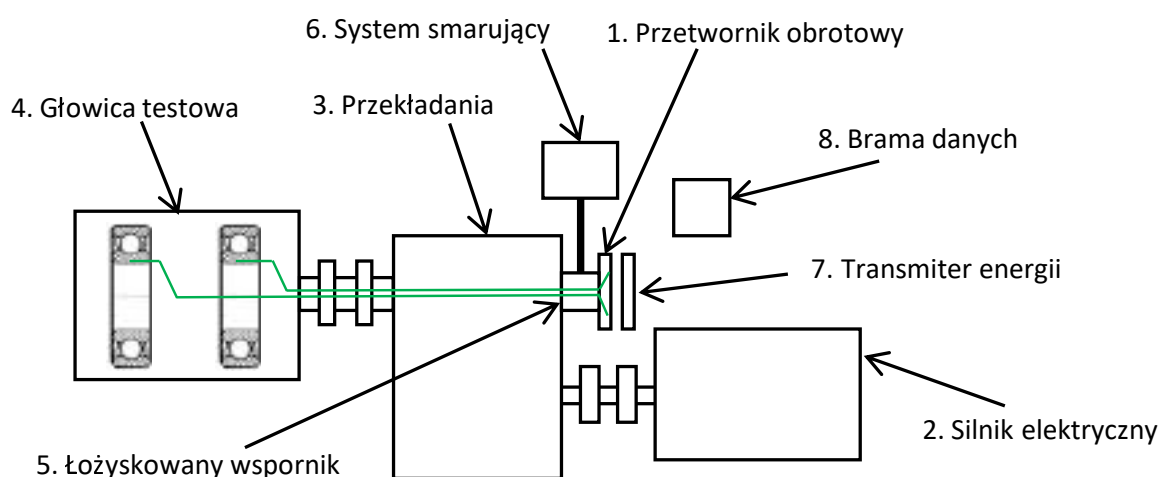
wyprowadzenia czujników lutuje lub zgrzewa się do płytki drukowanej zainstalowanej na wsporniku obrotowym (rys. 4.26). Po zamontowaniu złącza obrotowego, wyprowadzenia płytki montażowej zostają połączone z pierścieniami ślizgowymi, a sygnały mogą być przesyłane z części obrotowej na stacjonarną (rys. 4.27). Odpowiednie zaprojektowanie przetwornika



Rysunek 4.27. Zastąpienie złącza obrotowego zaprojektowanym modułem telemetrycznym

pozwoлиło na instalowanie go zamiast złącza obrotowego i wykorzystanie tego samego wspornika. Badania skupiają się na pomiarze temperatur, ponieważ jest to jeden z najbardziej istotnych parametrów mierzonych podczas testów obrotowych. Podczas testów łożyskowych, na jednym łożysku może być zainstalowanych nawet kilkadziesiąt termopar, a występują również testy gdzie na jednym wale testowane jest kilka łożysk. Moduł telemetryczny rozszerza możliwości laboratorium o wykonywanie długoterminowych testów, w których sprawdzana jest wytrzymałość komponentów obrotowych na cykle pracy. Dla łożysk bywa to nawet 30000 kilkunastominutowych cykli wykonywanych w sposób automatyczny, według

przygotowanego programu testu. Złącze obrotowe nie spełniało wymagań tego rodzaju badań ze względu na zużywanie się szczotek przekazujących sygnały, co dla testów na wysokich obrotach, ograniczało możliwy czas eksploatacji do kilkuset godzin. Na rysunku 4.28 zostało przedstawione docelowe miejsce i sposób montażu przetwornika obrotowego (1) na stanowisku do badania łożysk. W takiej konfiguracji silnik elektryczny (2) poprzez przekładnię (3) napędza głowicę testową (4). Przewody czujników będą prowadzone wzdłuż wału wysokich prędkości do modułu telemetrycznego znajdującego się na łożyskowanym wsporniku (5) połączonym z układem smarującym (6). Przetwornik obrotowy jest zasilany bezprzewodowo poprzez transponder (7), a dane są odbierane poprzez bramę danych (8). W celu oszaco-



Rysunek 4.28. Sposób wykorzystania przetwornika obrotowego na stanowisku testowym

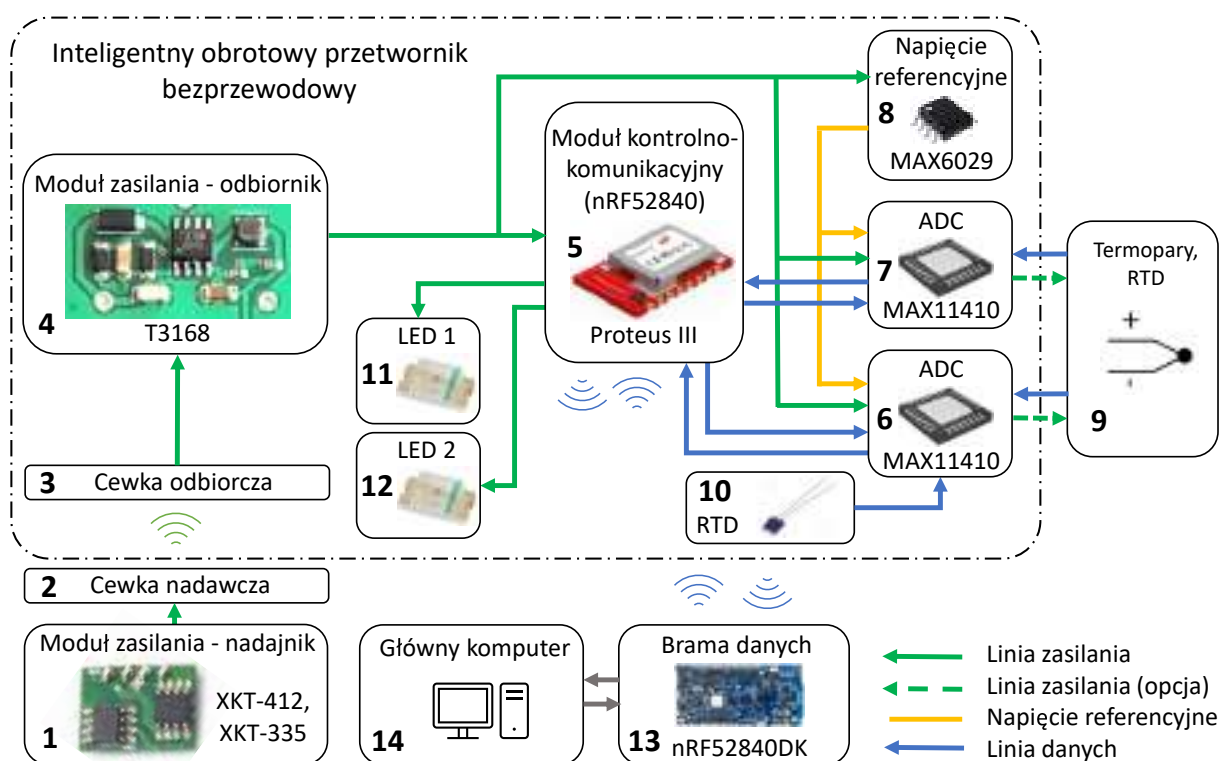
wania możliwości zastosowania komunikacji radiowej został przeprowadzony wstępny test. W pomieszczeniu testowym umieszczono układ z modułem rozwojowym układu nRF52840 zasilany bateryjnie (rys. 4.29). Układ został zainstalowany na silniku krokowym o maksymalnej prędkości do 3000 obr./min i był przemieszczany w różne obszary stanowiska testowego wysyłając niezmienny komunikat tekstowy do telefonu obsługującego BLE, podczas pracy stanowiska testowego. Pozytywne wyniki, również w pobliżu napędów elektrycznych, pozwoliły na kontynuowanie prac i dopracowanie wymagań.



Rysunek 4.29. Układ do wstępnych testów komunikacji radiowej przy obracającym się module BLE

4.2.2 Struktura systemu

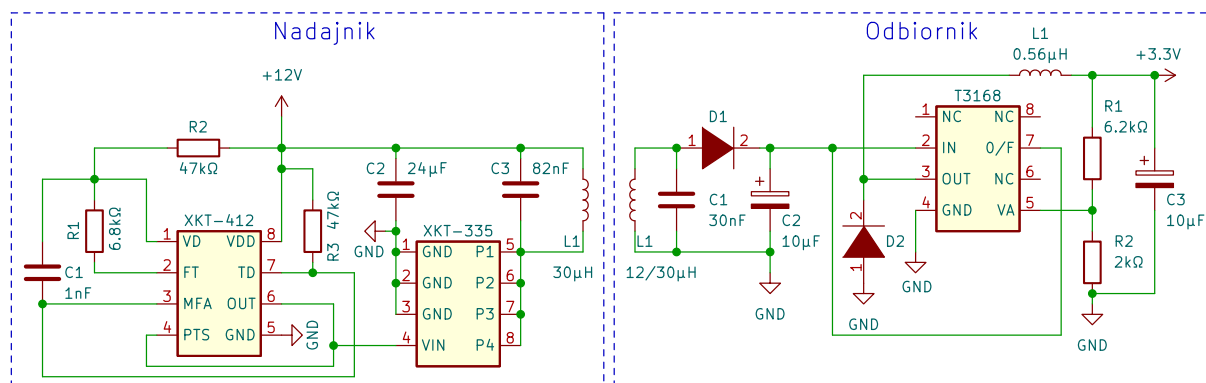
Zestawione wymagania projektowe posłużyły do zaplanowania struktury systemu (rys. 4.30). Projekt stanowi adaptację struktury przetwornika opisywanego w rozdziale 4.1, do wymagań testów wykonywanych przy wysokich prędkościach obrotowych. Po wstępnych próbach wykorzystania zasilania radiowego zostało ono zastąpione przez zasilanie indukcyjne [148].



Rysunek 4.30. Struktura systemu telemetrycznego obrotowego

Moduł nadawczy (1) poprzez cewkę (2) zasila układ. Po stronie przetwornika energia jest odbierana przez cewkę (3) podłączoną do modułu odbiornika (4), w którym przebieg zmienny jest prostowany i stabilizowany do wartości napięcia odpowiedniej do zasilania modułu kontrolno-komunikacyjnego (5) oraz pozostałych elementów elektronicznych. Zastosowano dwa przetworniki analogowo-cyfrowe (6 i 7), w celu zwiększenia liczby dostępnych kanałów pomiarowych do szesnastu. Źródłem napięcia referencyjnego dla przetwornika jest układ scalony o wysokiej dokładności (8). Przyjęta konfiguracja pozwala na obsługę ośmiu termopar w trybie różnicowym lub czterech czteroprzewodowych czujników RTD (9). Tak samo jak w poprzednim projekcie, kompensacja temperaturowa pomiarów jest przeprowadzana przy wykorzystaniu czujnika PT1000 (10), zainstalowanego w pobliżu złącza czujników. Przetwornik obrotowy posiada również dwie diody (11 i 12), służące do testowania programu i komunikacji z użytkownikiem. Dane są przesyłane bezprzewodowo przez protokół Bluetooth Low Energy, do płytki zestawu rozwojowego (13), pełniącego rolę bramy danych, a następnie do komputera (14) poprzez transmisję szeregową. Taka struktura została opracowana podczas wielu testów wykonywanych z płytkami rozwojowymi poszczególnych elementów. Zasilanie

indukcyjne zostało wykorzystane ze względu na znacznie większy zapas przesyłanej mocy w stosunku do zasilania radiowego, co może być potrzebne w przypadku późniejszego przeskalowania projektu na większą liczbę kanałów pomiarowych. Zastosowanie obrotowego modułu telemetrycznego nie wymaga zapewniania takiej swobody zmiany lokalizacji, jak przy wcześniej przedstawionym przetworniku o zasilaniu radiowo-bateryjnym. Urządzenia tego rodzaju mają zazwyczaj z góry ustaloną pozycję na stanowisku testowym, na końcu jednego z wałów obrotowych. W początkowym etapie prac moduł był projektowany jako urządzenie zasilane radiowo. Powstał również prototyp o zasilaniu radiowym, wykorzystujący moduł zasilania P1110b firmy Powercast. Prace były wykonywane równolegle do tych opisywanych w podrozdziale 4.1, dotyczących uniwersalnego przetwornika pomiarowego. Wyniki tamtych badań oraz ograniczone możliwości zasilania prototypu przetwornika obrotowego zasilanego radiowo (maksymalnie kilka centymetrów zasięgu przy niskich częstotliwościach pomiarowych, ograniczonej liczbie kanałów i nadajniku o mocy 3 W), były przyczyną zmian w sposobie zasilania urządzenia. Zasilanie bateryjne zostało odrzucone na etapie przeglądu rozwiązań ze względu na ograniczony czas pracy, zwiększenie masy układu oraz problem z precyzyjnym i pewnym montażem, umożliwiającym wymianę baterii i brak dodatkowych niewyważań przy wysokich prędkościach obrotowych. Występuje również ryzyko wewnętrznego uszkodzenia baterii na skutek działania sił odśrodkowych. Finalnie wybrane zasilanie indukcyjne wykorzystuje popularne układy scalone dedykowane realizacji zasilania w prostych ładowarkach indukcyjnych i innych urządzeniach zasilanych bezprzewodowo na krótkim zasięgu. Strona nadawcza wykorzystuje układ XKT-412 oraz XKT-335 (rys. 4.31). Pierwszy z wymienionych układów odpowiada za generowanie

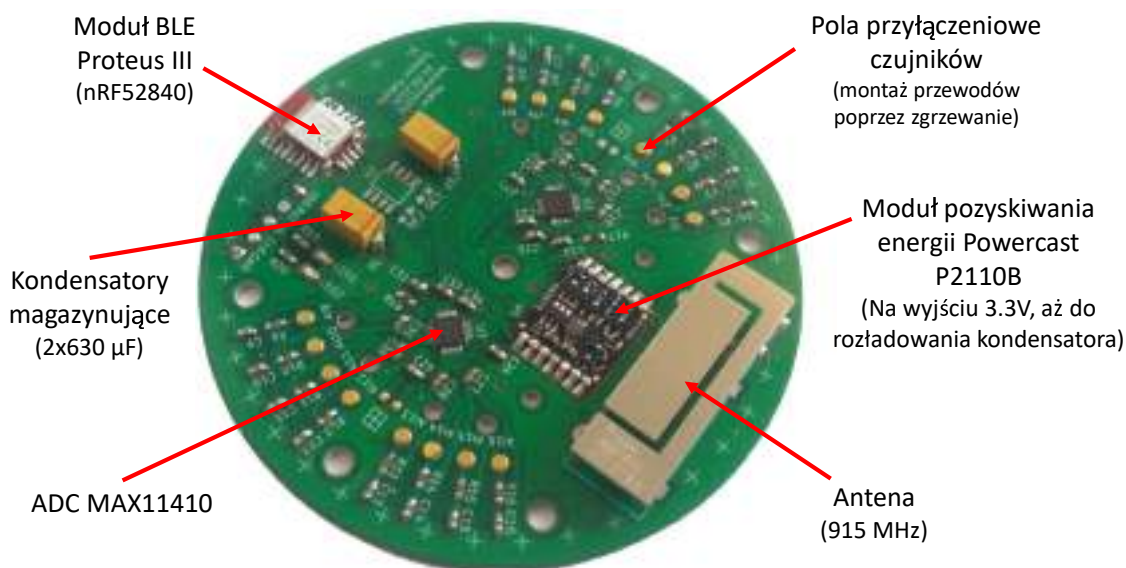


Rysunek 4.31. Schemat strony nadawczej i odbiorczej układu przekazywania energii

przebiegu o częstotliwości 70 kHz, a drugi za podniesienie napięcia do wartości szczytowej około 50V podawanego na cewkę nadawczą. Pierwotnie oba moduły współpracowały z cewkami o indukcyjności 30 μH , co zostało zmodyfikowane w dalej przedstawiony sposób. Odbiornik zintegrowany z główną płytką PCB jest zbudowany z wykorzystaniem prostownika diodowego, kondensatorów filtrujących i układu T3168 regulującego napięcie wyjściowe. Napięcie na wyjściu układu może zostać dopasowane przez zmianę rezystorów.

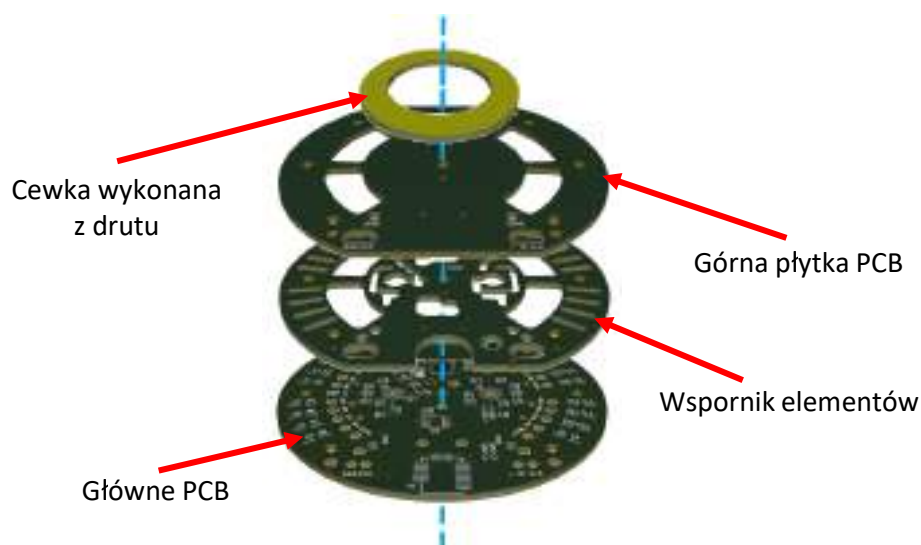
4.2.3 Projekt PCB

Jak już przedstawiono wcześniej początkowo obrotowy, przetwornik pomiarowy był projektowany jako urządzenie zasilane radiowo (rys. 4.32). Przygotowany prototyp nie pozwalał jednak na jednoczesną obsługę wszystkich kanałów pomiarowych, a przy zredukowanej liczbie kanałów zasięg zasilania wynosił tylko kilka centymetrów. Przy 16 wejściach pomiarowych,



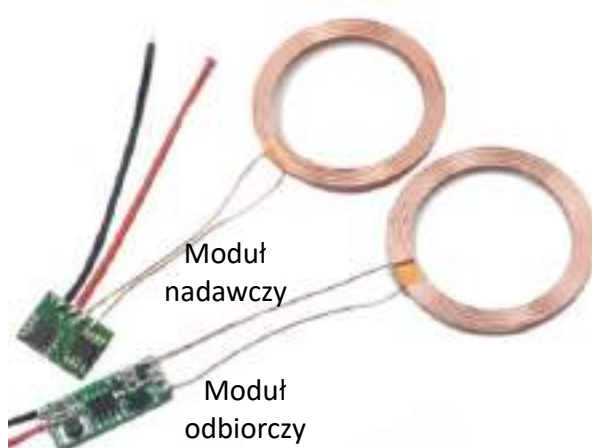
Rysunek 4.32. Pierwszy prototyp przetwornika wysokoobrotowego zasilany radiowo

urządzenie pracuje przez większość czasu poza trybem uśpienia, co skutkuje podwyższonym zużyciem energii w stosunku do modułów jednokanałowych. Prototyp został uszkodzony podczas jednego z pierwszych testów obrotowych poprzez skrzywienie i odłamanie się anteny zasilającej układ, co miało również wpływ na poszukiwanie sposobu montażu elementów zapewniającego bezpieczeństwo użytkowania układu. System telemetryczny, projektowany z myślą o wykorzystaniu w testach obrotowych komponentów lotniczych, musi być odporny na wysokie siły odśrodkowe, wibracje oraz zmiany temperatur wynikające z przeprowadzanych testów, działające na każdy z elementów elektronicznych. Funkcjonalność pomiarowa bez obrotów urządzenia została potwierdzona już na etapie pierwszego prototypu. W drugim prototypie zostało zmodyfikowane zasilanie układu, w sposób zgodny ze strukturą przedstawioną w poprzednim podpunkcie. Drugi prototyp urządzenia miał już zatem postać modułu zasilanego na drodze indukcyjnej z uwzględnieniem wymagań, co do potrzeby wzmocnienia mocowania elementów na płytce PCB. Efektem prac jest zaproponowanie metody konstruowania telemetry obrotowej zapewniającej pewny montaż elementów na głównej płytce PCB, przy niskich kosztach wdrożenia (rys. 4.33). Rolę bazowych elementów urządzenia pełnią wyłącznie połączone płytki PCB. Elementy elektroniczne są ukryte w wyfrezowanych otworach pomiędzy kolejnymi warstwami, co pozwala na przeciwstawienie się działającym na nie siłom odśrodkowym. Rowki podczas montażu są wypełniane klejem, który łączy również płytki PCB pomiędzy sobą. W tej wersji prototypu urządzenia górna płytka pełniła rolę wspornika dla cewki wykonanej z drutu

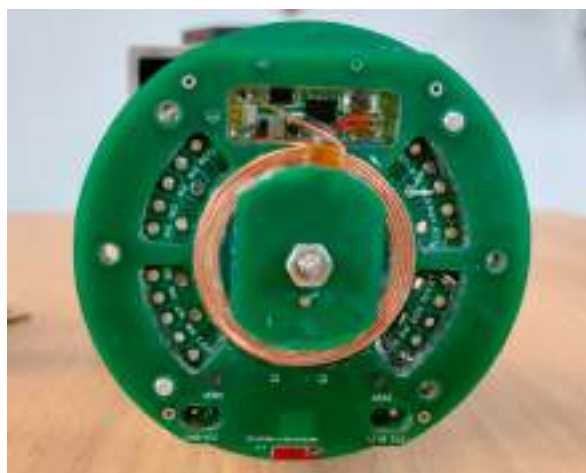


Rysunek 4.33. Struktura zaprojektowanego modułu telemetrycznego – prototyp II

oraz ekranu elektromagnetycznego i była w całości pokryta miedzą. Wykorzystano tutaj moduł nadajnika zasilającego i odbiornika w postaci gotowych modułów (rys. 4.34a). Przeprowadzone wstępne testy obrotowe i stacjonarne potwierdziły działanie drugiego prototypu (rys. 4.34b) urządzenia do pełnej zakładanej prędkości obrotowej 20000 obr./min. Jednocześnie zauważono, że najsłabszym punktem projektu jest zastosowanie cewki indukcyjnej w postaci zwojów drutu oraz gotowej płytki układu zarządzającego pozyskiwaniem energii. Zainstalowana cewka wykonana z drutu jest trudna w montażu i potencjalnie może się odkształcić lub częściowo odwinąć, co spowodowałoby niewyważenie. Było to powodem poszukiwania alternatywnych rozwiązań i możliwości przeprojektowania układu pod tym kątem, co doprowadziło do wykonania trzeciego prototypu urządzenia, którego konstrukcja i badania zostaną dalej przedstawione.



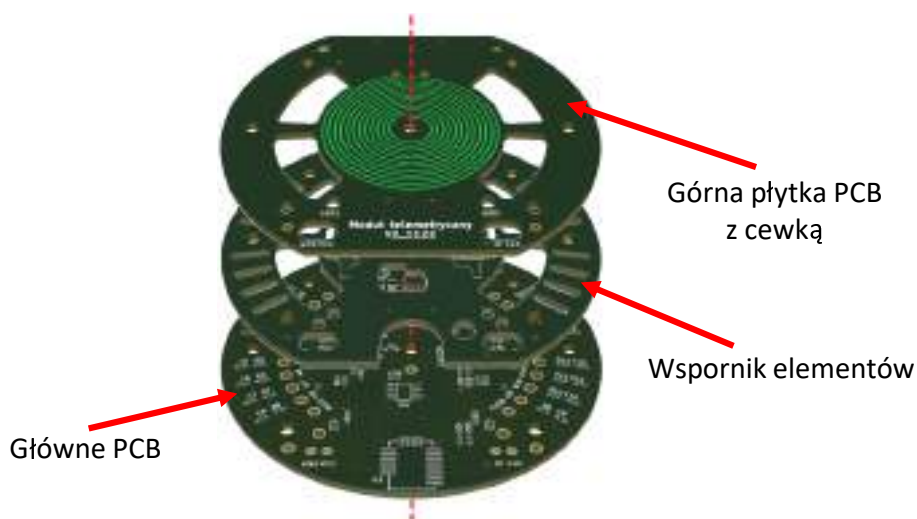
(a) Wykorzystane moduły zasilające



(b) Drugi prototyp podczas testów

Rysunek 4.34. Moduły zasilające i moduł telemetryczny - prototyp II

Efektem prac było zaproponowanie konstrukcji urządzenia z cewką odbiorczą w postaci wielowarstwowej płytki PCB (rys. 4.35), co jest w zgodzie z ogólnym założeniem o redukcji kosztów i uproszczeniu konstrukcji modułów telemetrycznych, sformułowanych w założeniach projektowych. Przy takiej konstrukcji wszystkie warstwy modułu telemetrycznego są wykonane w tej samej technologii, co może znacznie uprościć produkcję większej liczby urządzeń (zał. 6, 7 i 8). Stosowane oprogramowanie KiCad nie posiada funkcji pozwalających

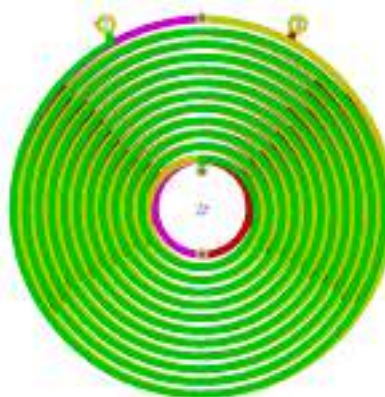


Rysunek 4.35. Struktura zaprojektowanego modułu telemetrycznego – prototyp III

na bezpośrednie zaprojektowanie cewek w postaci ścieżek na płycie PCB. Znane są jednak dwa rozwiązania pozwalające na wprowadzenie spiralnego kształtu. Można przygotować program w języku Python, który poprowadzi ścieżkę według zaprogramowanej logiki lub skorzystać z modułu „Bitmap to Component Converter” (będącego częścią pakietu projektowego KiCad), służącego do transformacji plików graficznych na komponenty, które mogą zostać użyte w projekcie. Do zaprojektowania cewki (rys. 4.36) została wykorzystana metoda graficzna. Kształt cewki został zaprojektowany w programie Inkscape, wyposażonym w edytor spiralnych kształtów, przy uwzględnieniu ograniczeń geometrycznych wynikających z projektu. Płytką



(a) Model 3D



(b) Projekt KiCad

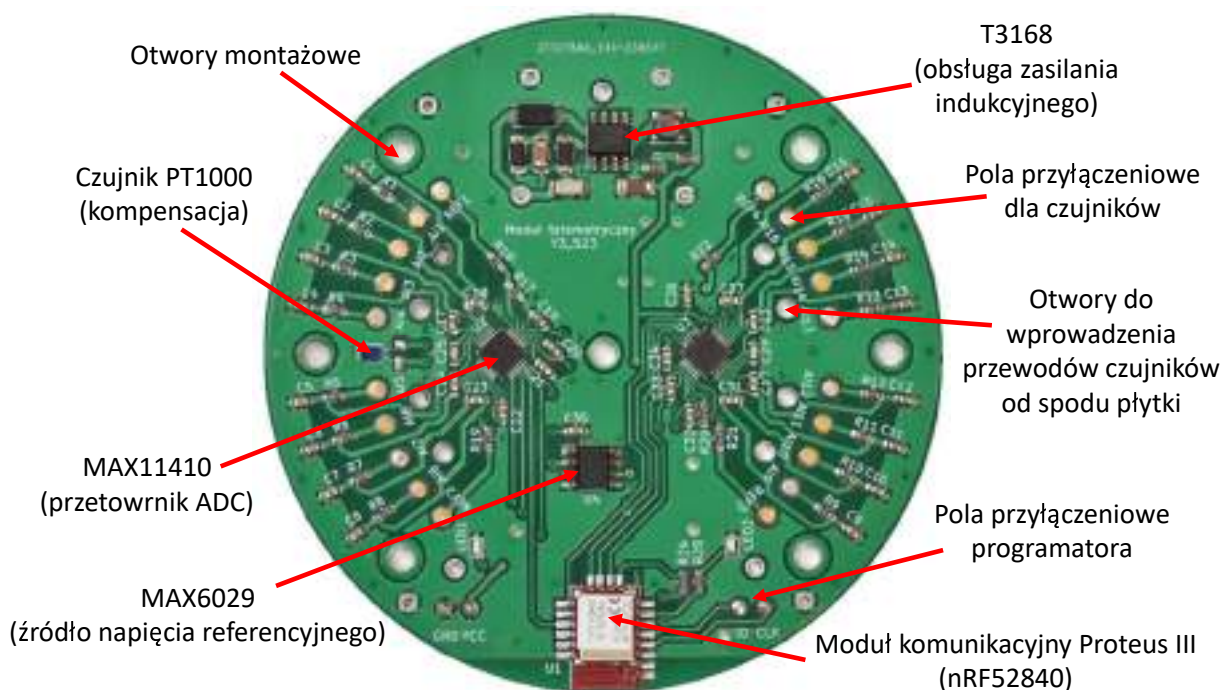
Rysunek 4.36. Czterowarstwowa cewka odbiorcza - prototyp III

odbiorcza została wykonana jako płytki pięciowarstwowa, gdzie cztery warstwy pełnią rolę cewek, a ostatnia warstwa rolę ekranu elektromagnetycznego. Kolejne warstwy cewki odbiorczej są połączone, ze swoimi lustrzanymi odbiciami, ze względu na konieczność uzyskania zgodnego kierunku przepływu prądu. Uzyskano w ten sposób cewkę o indukcyjności $11.6 \mu\text{H}$, co jest wynikiem słabszym w stosunku do oryginalnej cewki o indukcyjności $28.9 \mu\text{H}$ wykonanej z drutu (rys. 4.37). Uzyskanie konkretnej precyzyjnej wartości indukcyjności nie było istotne, przed



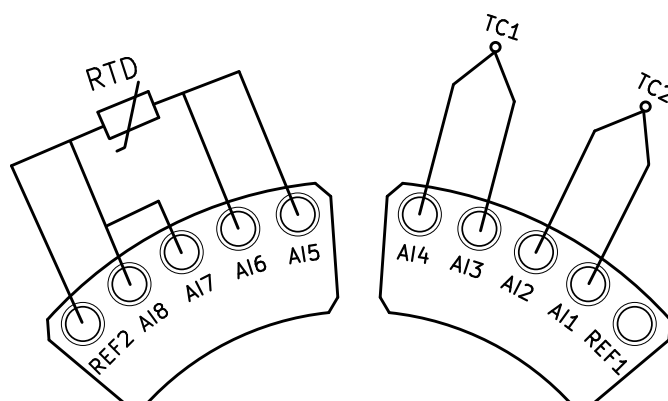
Rysunek 4.37. Pomiar indukcyjności cewek

przystąpieniem do projektowania zostały tylko przeprowadzone oszacowania indukcyjności. W celu uproszczenia projektu w stosunku do pierwszego prototypu przeprojektowano bazową PCB i wyposażono ją w możliwość obsługi bezprzewodowego odbioru energii (rys. 4.38). Zostały wykorzystane te same elementy, co w przypadku niezależnego układu odbiorczego wykorzystanego w drugim prototypie urządzenia. Układ nadajnika zasilającego został wykorzystany bez zmian, również pod względem wykorzystania cewki wykonanej z drutu. Projekt



Rysunek 4.38. Główna płytki PCB z zainstalowanymi komponentami - prototyp III

głównej płytki PCB pozwala na prowadzenie przewodów czujników od spodu na wierzchnią stronę płytki, gdzie końcówki przewodów mogą być zgrzewane do pól kontaktowych (rys. 4.39). Jest to podyktowane prowadzeniem przewodów wzdłuż wału obrotowego i instalowaniem



Rysunek 4.39. Sposób podłączenia termopar i rezystancyjnych czujników temperatury

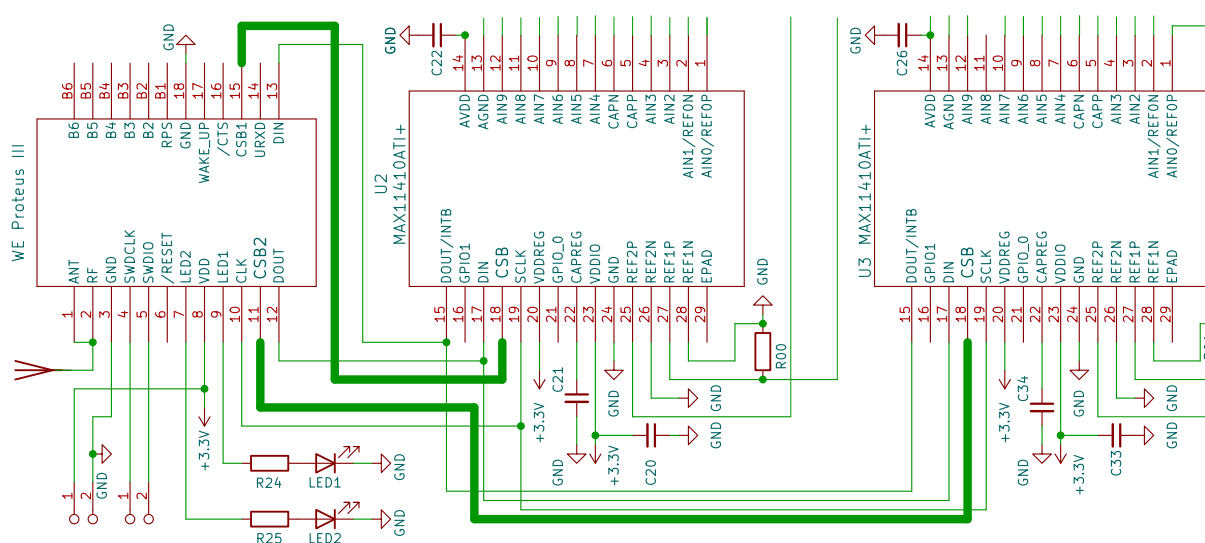
modułu telemetrycznego na jego końcu. Każde z pól przyłączeniowych jest połączone z wyprowadzeniem jednego z dwóch przetworników analogowo-cyfrowych. W ten sposób jest obsługiwane 16 wejść pomiarowych, co przekłada się na obsługę ośmiu termopar w trybie pomiaru różnicowego lub czterech rezystancyjnych czujników temperatury. Pomiar rezystancji czujników rezystancyjnych odbywa się tak samo jak w przypadku pierwszego prototypu poprzez odniesienie do rezystora referencyjnego, do czego są wykorzystywane wyjścia REF pełniące rolę źródła prądowego. Przy pomiarach, z wykorzystaniem termopar, źródłem napięcia referencyjnego dla układu MAX11410 jest precyzyjne źródło napięcia MAX6029. Położenie układów na płytce PCB zostało zaplanowane tak, żeby ograniczyć konieczność korekcji mas przy wyważaniu układu. Zmontowany trzeci prototyp przetwornika obrotowego został przedstawiony na rysunku 4.40.



Rysunek 4.40. Zmontowany moduł telemetryczny - prototyp III

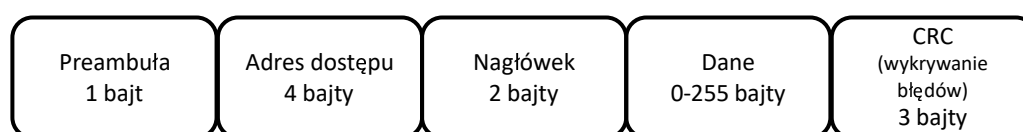
4.2.4 Program sterujący i komunikacja

Program kontrolujący pracę przetwornika obrotowego jest bardzo podobny do programu obsługującego przetwornik opisywany w rozdziale 4.1. Schemat przedstawiony na str. 64 jest aktualny również dla tego projektu. Zmienia się jednak zakres operacji w poszczególnych blokach. W tym przypadku występują dwa przetworniki analogowo cyfrowe typu MAX11410, wykonujące łącznie pomiary na ośmiu kanałach różnicowych. Przetworniki są obsługiwane jeden po drugim poprzez protokół SPI. Przetwornik, z którym komunikuje się mikrokontroler jest wybierany poprzez podanie stanu wysokiego na jedną z dwóch linii CSB (rys. 4.41). Przetworniki i moduł BLE są przełączane w stan uśpienia gdy nie są używane, tak jak to miało miejsce w pierwszym projekcie. Drugą różnicą w stosunku do pierwszego projektu



Rysunek 4.41. Sterowanie przetwornikami ADC (pogrubione linie CSB)

jest organizacja danych w ramce BLE. W pierwszym projekcie z 1-2 kanałami pomiaru temperatury wystarczające było 27 bajtów domyślnie ustawione dla ramki BLE. W tym wypadku występuje 8 kanałów pomiaru temperatury obiektu testowego oraz pomiar temperatury płytki PCB. Potrzebne jest skorzystanie z rozszerzenia ramki, co jest ustawiane w plikach konfiguracyjnych modułu BLE. Maksymalnie w jednej ramce może zostać przesłanych 255 bajtów danych (rys. 4.42). Zmierzone dane pomiarowe są przesyłane z dokładności do dwóch miejsc po przecinku. Przed wysłaniem są one formatowane do postaci pięciocyfrowych ciągów uzupełnianych o nazwę kanału i znak # pełniący rolę separatora. Po odbiorze przecinek może być wstawiony pomiędzy trzecią i czwartą cyfrą dla każdego zestawu pięciu cyfr w odebranych ciągu znaków, podobnie jak ma to miejsce w projekcie pierwszym.



Rysunek 4.42. Ramka danych przesyłanych poprzez BLE

4.2.5 Badania prototypów

Możliwości komunikacyjne i pomiarowe wytypowanych komponentów zostały przetestowane dokładnie w rozdziale 3.1. Wprowadzenie zasilania indukcyjnego, wielu kanałów pomiarowych, nowego sposobu montażu oraz pracy na wysokich prędkościach obrotowych wprowadza jednak ryzyko potencjalnych zakłóceń pracy lub uszkodzenia układu. Z tego względu zaprojektowany obrotowy moduł telemetryczny musiał zostać przetestowany w warunkach zbliżonych do rzeczywistych warunków eksploatacji w laboratorium.

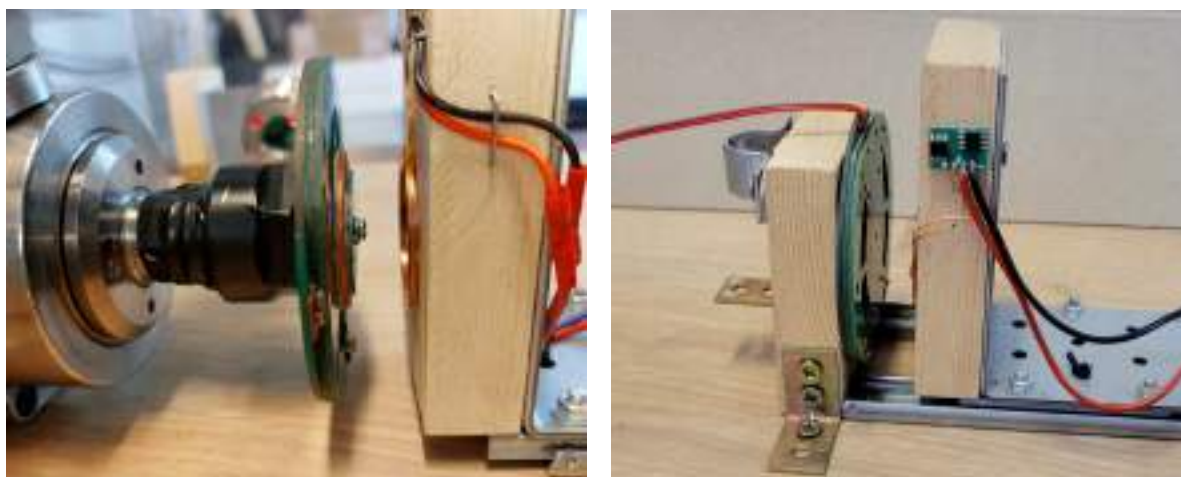
Zasilanie przetwornika

W pierwszym etapie badań zasilania zmierzono pobór prądu przetwornika. W tym celu został on zasilony poprzez układ nRF Power Profiler Kit II (rys. 4.43). Takie badanie zostało wykonane zarówno dla ośmiu podłączonych termopar, jak i czterech czujników rezystancyjnych typu PT1000. Oba badania zostały przeprowadzone przy maksymalnej zakładanej częstotliwości pomiarowej 2 Hz. Dla termopar uzyskano średni pobór prądu na poziomie 4,2 mA, a dla czujników rezystancyjnych 3,1 mA. W tym projekcie energia nie jest jednak magazynowana w kondensatorach pomiędzy cyklami transmisji i pomiarów, jak miało to miejsce dla przetwornika o zasilaniu radiowo-bateryjnym badanego w poprzednim rozdziale. Wydajność prądowa źródła musi być zatem wystarczająca żeby w każdym momencie zasilić układ podczas transmisji i pomiarów, a zasięg zależy w większym stopniu od szczytowych wartości prądu niż średniego zużycia. Minimalna wydajność prądowa źródła zasilania musi zatem wynosić przynajmniej 15 mA, co odpowiada chwilowemu poborowi prądu podczas komunikacji bezprzewodowej (przedstawione wcześniej w podrozdziale 4.1.7 rys. 4.21). Z tego względu, podczas testu zasilania modułu telemetrycznego ograniczono się do sprawdzenia skrajnego przypadku najwyższej częstotliwości pomiarowej. Podczas badania maksymalnego zasięgu moduły były instalowane na wale silnika, a cewka zasilająca na ruchomym wózku umożliwiającym zmianę odległości. Zaprojektowany przetwornik był zbliżany do modułu



Rysunek 4.43. Badanie poboru prądu przetwornika obrotowego

zasilającego aż do momentu uruchomienia i nawiązania stabilnej komunikacji (rys. 4.44a). W ten sposób uzyskano graniczne odległości zasilania modułów. Dla cewki PCB jest to 5 mm, a dla cewki wykonanej z drutu 20 mm (zapas około 1 mm zapewniający stabilną pracę). Prędkość obrotowa nie wpływała zauważalnie na zasięg zasilania, co zostało potwierdzone przy przedstawionych dalej testach obrotowych. W docelowej konfiguracji modułu telemetrycznego

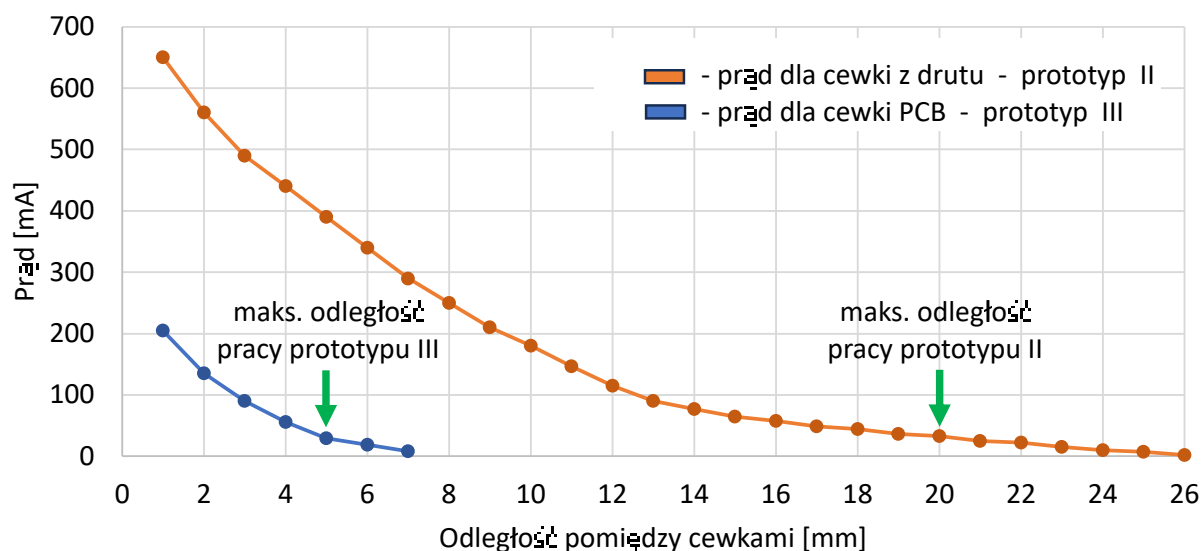


(a) Badanie maks. zasięgu zasilania - Prototyp II

(b) Badanie charakterystyki zasilania - Prototyp III

Rysunek 4.44. Stanowiska do badania zasilania bezprzewodowego

nie było jednak możliwości zmiany obciążenia i określenia możliwości bezprzewodowego przesyłania energii. W związku z tym, w kolejnym z testów elementy elektroniczne przetwornika zastały odcięte od układu zasilania i zastąpione potencjometrem, na co pozwalała konstrukcja płytki PCB (rys. 4.44b). W ten sposób przetestowano niezależnie część zasilającą układu. Przy każdej zmianie odległości rezystancja była zmniejszana, aż do momentu kiedy zaczął być obserwowany gwałtowny spadek napięcia poniżej wartości wyjściowej 3,3 V. Odczytana wartość natężenia prądu była przyjmowana jako maksymalna wartość możliwa do uzyskania (rys. 4.45)



Rysunek 4.45. Prądy dostępne po stronie odbiorczej przy stabilizowanym napięciu 3,3 V

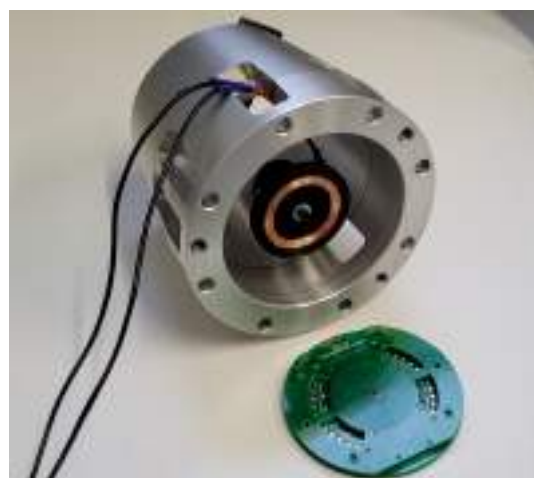
przy danej odległości pomiędzy cewkami. Zasięg dla modułu z cewką wykonaną z drutu był około 4 razy szerszy. Jest to wynik zgodny z oczekiwaniami z uwagi na różnicę w indukcyjnościach oraz inną geometrię cewki PCB. Testy pokazują znaczny zapas przesyłanej mocy w stosunku do wymagań przetwornika dla obu rozwiązań, co może w przyszłości umożliwić rozszerzenie możliwości przetwornika.

Pomiary - testy stacjonarne

Pierwsze testy prototypów 2 i 3 zostały wykonane bez obrotów i miały na celu potwierdzenie dokładności pomiarów i braku negatywnego wpływu sposobu montażu na działanie komponentów elektronicznych. Sprawdzenie możliwości pomiarowych zostało wykonane w sposób analogiczny do tych wykonanych w rozdziale 4.1. Termopara ze spoiną pomiarową umieszczoną w dokładnym piecu referencyjnym była podłączona do modułu wygrzewanego w piecu do temperatury 60°C (rys. 4.46a). Pozwalało to na kontrolowanie temperatury obu końców termopary i symulowanie różnych przypadków testowych. Przeprowadzony test wykazał działanie kompensacji temperaturowej. Przetwornik był zasilany bezprzewodowo poprzez cewkę zasilającą umieszczoną nad modułem za pomocą docelowego wspornika (rys. 4.46b). Zostały również wykonane badania z zewnętrznymi czujnikami rezystancjami podłączonymi do przetwornika zainstalowanego w piecu. Każdy z kanałów został ponadto sprawdzony poprzez wzorcowany symulator termopar i czujników rezystancyjnych. Dla obu testowanych grup czujników i wszystkich przypadków testowych w zakresie temperatur 0-300°C pomiary odbiegały od wzorca nie więcej niż 1°C. W przypadku testów ostatniego trzeciego prototypu został również wykonany test polegający na wykonaniu 20 cykli wygrzewania i chłodzenia przetwornika, w celu oceny ryzyka związanego z powstawaniem uszkodzeń na skutek naprężeń wewnątrz struktury układu. Poddanie przetwornika cyklom temperaturowym nie wpłynęło na prawidłową pracę układu.



(a) Badania modułu w piecu

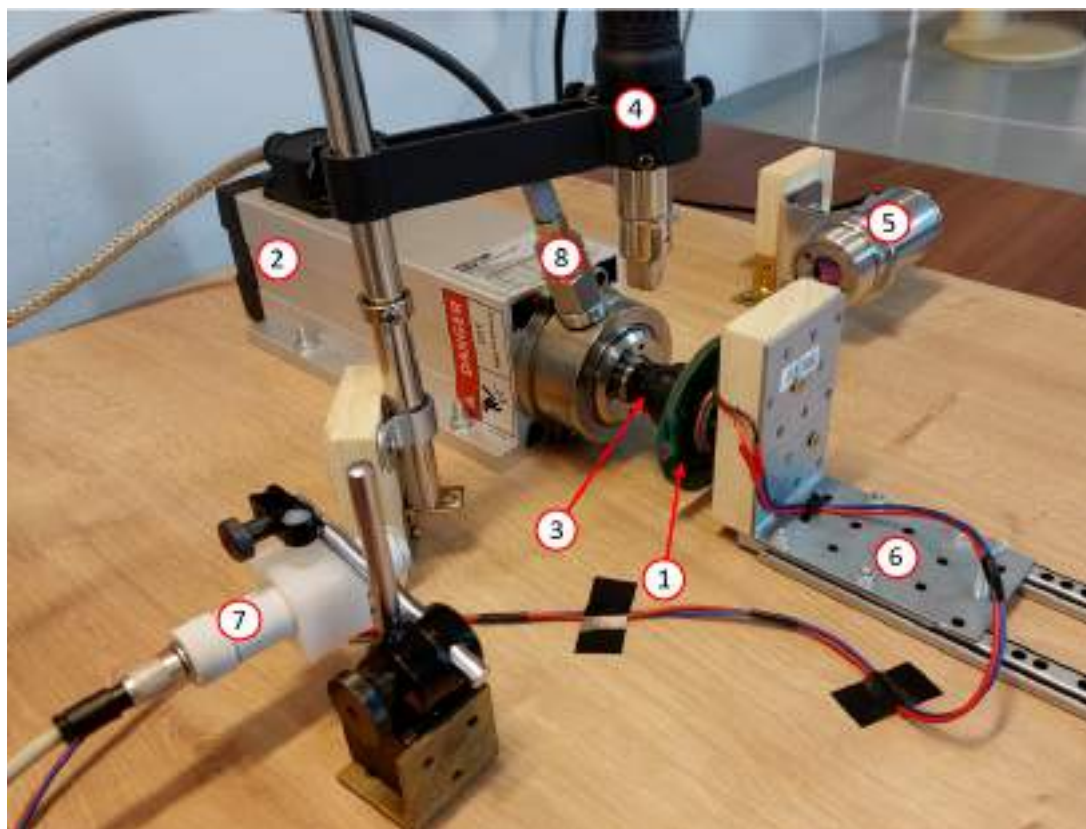


(b) Cewka zasilająca zainstalowana na wsporniku.

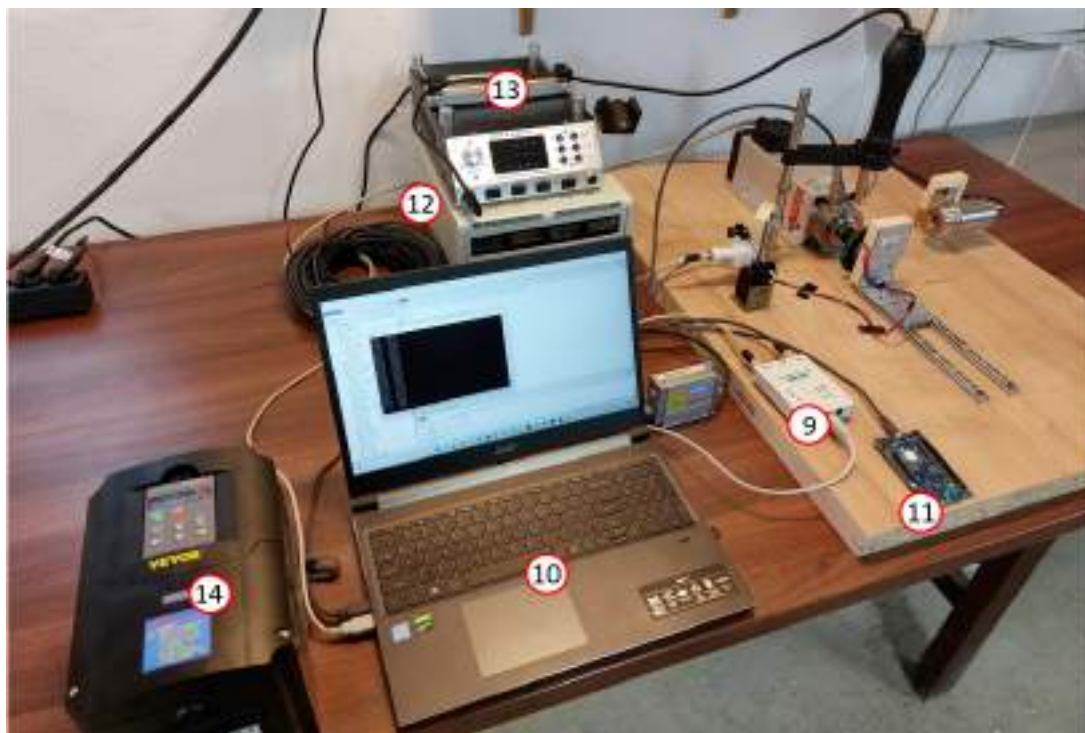
Rysunek 4.46. Stacjonarne badania modułu telemetrycznego

Pomiary - testy obrotowe

W celu potwierdzenia działania systemu podczas obrotów, zostało przygotowane stanowisko testowe (rys. 4.47 i 4.48), pozwalające na zmianę oraz pomiar temperatury i prędkości obrotowej. Podczas testów moduł telemetryczny (1) został zainstalowany na silniku (2) i rejestrował pomiary z termopary (3) zainstalowanej na wale. Temperatura mogła być zmieniana dzięki precyzyjnej nagrzewnicy powietrza (4) skierowanej na wał i mierzona referencyjnym bezkontaktowym czujnikiem temperatury (5). Układ był zasilany bezprzewodowo poprzez cewkę indukcyjną, zainstalowaną na ruchomym wsporniku (6). Osiągnięcie zakładanych prędkości obrotowych wymagało przeprowadzenia wyważenia dynamicznego układu z wykorzystaniem czujnika prędkości obrotowej (7) i czujnika wibracji (8), które są elementami systemu do wyważania razem z układem pomiarowym (9) oraz aplikacją zainstalowaną na komputerze (10). Dane przesyłane bezprzewodowo są odbierane przez moduł nRF52840DK pełniący rolę bramy danych, który przesyła dane poprzez szeregowe połączenie przewodowe do komputera z zainstalowaną aplikacją terminalową. Wszystkie urządzenia pomiarowe są zasilane przez zasilacz (12). Za sterowanie pracą nagrzewnicy powietrza odpowiada kontroler (13), a prędkość napędu może być zmieniana przy wykorzystaniu panelu kontrolnego inwertera (14). Badania zostały przeprowadzone dla drugiego i trzeciego prototypu urządzenia. Nie zauważono różnic w dokładności pomiarowej.

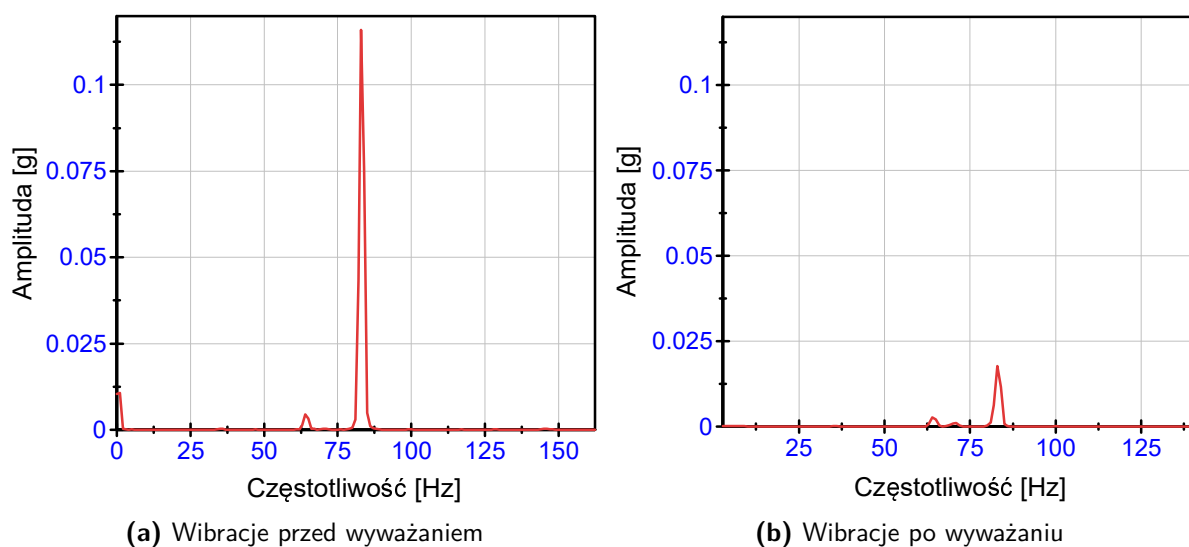


Rysunek 4.47. Przygotowane stanowisko testowe - zainstalowany prototyp II (widok 1/2)



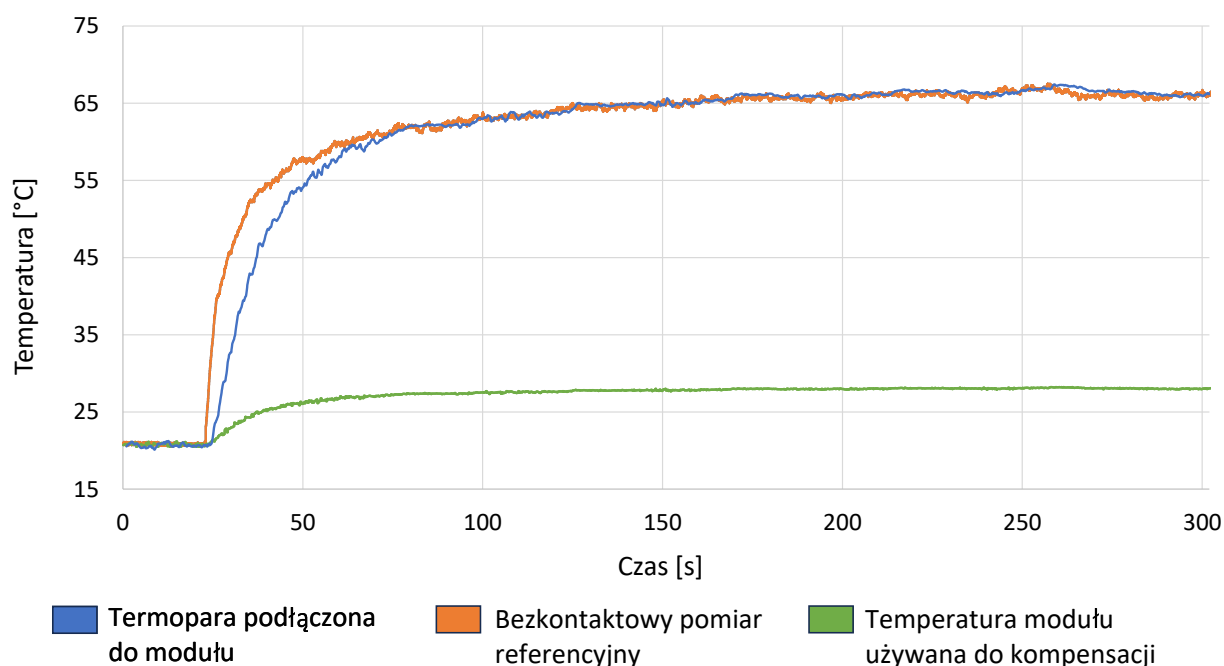
Rysunek 4.48. Przygotowane stanowisko testowe - zainstalowany prototyp II (widok 2/2)

Każdy z układów został wyważony z wykorzystaniem systemu wyważającego firmy RK-Systems przez nawiercenia w płytkach PCB (rys. 4.49), na już zmontowanych przetwornikach. System wyważający wskazuje miejsce korekcji, bazując na zależności przesunięcia fazowego pomiędzy sygnałem prędkości i sygnałem wibracji, a umiejscowieniem niewyważenia. Do określenia wartości masy korekcyjnej wykorzystuje również wartość amplitudy wibracji. Algorytm dzieli masę korekcyjną na składowe w miejscach wytypowanych do korekty masy. Uwzględnienie potencjalnego stopnia niewyważenia w procesie rozlokowania elementów na płycie przetwornika znacznie uprościło przeprowadzenie procesu wyważania.



Rysunek 4.49. Efekt wyważania na prędkości 5000 obr./min - Prototyp III

Docelowe testy przeprowadzone na przygotowanym stanowisku polegały na skokowej zmianie temperatury powietrza przez zmianę nastawy na kontrolerze nagrzewnicy przy stałej prędkości obrotowej. Po każdej zmianie temperatury układ był wychładzany, po czym zwiększano prędkość obrotową do kolejnej stałej wartości testowej. Praca modułu telemetrycznego została w ten sposób potwierdzona do prędkości 20000 obr./min, co spełnia założone wymagania projektowe. Na rysunku 4.50 przedstawiono porównanie temperatury mierzonej poprzez moduł telemetryczny z pomiarem referencyjnym przy skokowej zmianie temperatury na stałej prędkości obrotowej i pomiarach z częstotliwością 1 Hz. Układ komunikacyjny i przetworniki były



Rysunek 4.50. Skokowa zmiana temperatury na prędkości 20000 obr./min - Prototyp III

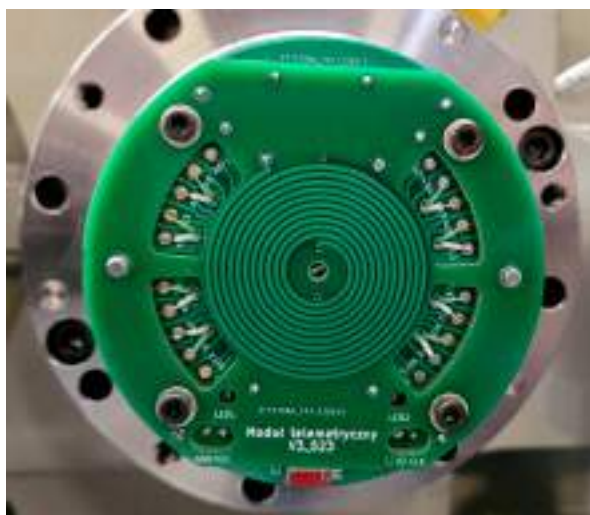
przełączane w stan uśpienia zgodnie z wcześniej przedstawionym programem sterującym. Dane były wysyłane z dokładnością do dwóch miejsc po przecinku. Przy takiej konfiguracji urządzenia moduły mogły być zasilane przy odległościach pomiędzy cewką nadawczą i odbiorczą jak przy teście stacjonarnym. Wymagania, co do oszczędzania energii, nie były tak restrykcyjne jak w przypadku modułu o zasilaniu radiowo-baterijnym (opisanym wcześniej w rozdziale 4.1), ponieważ dla odległości wewnątrz podanego zakresu wybrany sposób zasilania zapewniał zapas dostępnej mocy. Zgodnie z założeniami stwarza to również możliwość późniejszego przeprojektowania przetwornika obrotowego na większą liczbę kanałów pomiarowych. Zasięg może zostać w łatwy sposób zwiększony poprzez dodanie do układu kondensatora, który będzie gromadził energię pomiędzy operacjami pomiarowymi i komunikacyjnymi.

Instalacja modułu w docelowym miejscu pracy

Gdy działanie układu zostało już potwierdzone na przygotowanym stanowisku testowym, moduł telemetryczny został zainstalowany na docelowym łożyskowanym wsporniku (rys. 4.51a i rys. 4.51b) na przekładni przyspieszającej. Cewka zasilająca została umieszczona na wsporniku wykonanym w technologii druku 3D, który został przymocowany do wspornika, na którym była wcześniej montowana część nieobracająca się złącza obrotowego (rys. 4.51c i rys. 4.51d). Odległość od modułu mogła być dzięki temu regulowana. Zostały przeprowadzone testy stacjonarne zasilania układu i komunikacji, potwierdzające działanie zgodne z założeniami projektowymi. Metalowa osłona zredukowała zasięg komunikacji radiowej, jednak nadal była ona możliwa wewnątrz pomieszczenia testowego. Przeprowadzono również proste testy obrotowe. Dostępność stanowiska testowego była jednak ograniczona, wykonano zatem tylko podstawowe sprawdzenia potwierdzające zasilanie i komunikację układu.



(a) Przekładnia z zainstalowanym modulem



(b) Moduł z wyprowadzonymi przewodami



(c) Wspornik cewki zasilającej przy module



(d) Przekładnia z osłoną modułu

Rysunek 4.51. Montaż modułu telemetrycznego i cewki zasilającej - Prototyp III

4.2.6 Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu wiedzy zostały wytypowane założenia projektowe istotne z punktu widzenia laboratoriów testujących obrotowe komponenty lotnicze, które były podstawą do zaprojektowania obrotowego modułu telemetrycznego. Zostały zaprojektowane, wykonane i przetestowane trzy prototypowe moduły telemetryczne. Pierwszy moduł był konstruowany z myślą o bezprzewodowym zasilaniu radiowym, jednak nie oferował wystarczających parametrów. Z tego względu w drugim prototypie zostało zastosowane zasilanie indukcyjne. Trzeci prototyp był odpowiedzią na problemy zidentyfikowane podczas montażu i testów drugiego prototypu, które zostały wyeliminowane. Finalne urządzenie jest zasilane poprzez cewkę wykonaną w postaci ścieżek umieszczonych na wierzchniej płytce PCB, co znacznie uprościło projekt i zwiększyło solidność montażu. Zaproponowanie wykorzystania dodatkowej płytki wsporczej elementów elektronicznych zapewnia przeciwstawienie się siłom odśrodkowym, które potencjalnie mogłyby spowodować oderwanie układów od bazowej płytki PCB. Odpowiednie rozlokowanie elementów elektronicznych ułatwiło przeprowadzenie wyważania koniecznego do uzyskania wysokich prędkości obrotowych. Przeprowadzone badania oraz analizy potwierdzają poprawność działania i funkcjonalność zaprojektowanego rozwiązania. Wykonane testy wykazały możliwość pracy w typowych warunkach dla testów obrotowych do prędkości 20000 obr./min oraz odporność układu na podwyższoną temperaturę pracy. Wszystkie przedstawione badania zostały wykonane dla drugiego i trzeciego prototypu urządzenia. Układy nie wykazują różnic pod względem zasięgu i jakości komunikacji bezprzewodowej. Drugi prototyp z cewką wykonaną z drutu ma czterokrotnie szerszy zasięg zasilania w stosunku do prototypu trzeciego, ale jest problematyczny w montażu. Maksymalny zasięg zasilania trzeciego prototypu urządzenia wynosi 5 mm i spełnia wymagania projektowe. Praca nie uwzględnia pełnej analizy wytrzymałościowej układu, co może zostać uzupełnione w przyszłości. Zastosowana przepustowość protokołu komunikacyjnego, moc obliczeniowa wykorzystanego mikrokontrolera oraz możliwości przesyłania energii zostały zaplanowane z zapasem w stosunku do postawionych wymagań projektowych, co może zapewnić w przyszłości bazę do przeskalowania projektu na wyższą liczbę kanałów pomiarowych. Zaprojektowany moduł telemetryczny będzie wykorzystywany w testach wykonywanych w Laboratorium Badania Łożysk będącym jednym z laboratoriów badawczych Sieci Badawczej Łukasiewicz - Instytutu Lotnictwa. Rozszerzy on możliwości laboratorium o wykonywanie długoterminowych testów obrotowych, przy znacznym ograniczeniu kosztów wdrożenia telemetry obrotowej. Zwiększenie dostępności obrotowych rozwiązań telemetrycznych daje możliwość wykonywania większej liczby badań, przez co zwiększa się pewność na temat bezpieczeństwa eksploatacji testowanych komponentów. Przykładowo staje się możliwe równoległe testowanie wielu łożysk z wykorzystaniem telemetry, co do tej pory było znacznie utrudnione ze względu na zbyt wysokie koszty modułów telemetrycznych.

4.3 Inteligentny bezprzewodowy przetwornik kontrolujący pracę zaworów

Rozdział przedstawia prace prowadzące do skonstruowania sterownika kontrolującego pracę ustawnika zaworu używanego podczas testów komponentów lotniczych, obsługującego zasilanie poprzez baterie i komunikację bezprzewodową.

4.3.1 Założenia projektowe

Tak jak zostało przedstawione w rozdziale przeglądowym 2.2 podczas testów komponentów lotniczych powszechnie wykorzystuje się zawory z ustawnikami pozycyjnymi. Występują ustawniki wykorzystujące napędy pneumatyczne oraz elektryczne. W obu przypadkach są one zazwyczaj sterowane sygnałem prądowym (4-20 mA) lub napięciowym (0-10 V). Ustawniki pneumatyczne wymagają podłączenia sprężonego powietrza, a elektryczne przewodu zasilającego. Podobnie jak w przypadku czujników, tutaj również występuje konieczność częstej zmiany położenia w pomieszczeniu testowym. Zapewnienie bezprzewodowej obsługi czujników, bez wyposażenia ustawników pozycyjnych w podobne funkcje znacznie ograniczyłoby możliwości całego systemu pomiarowego. Nadal byłoby wymagane prowadzenie przewodów zasilających i sterujących. Doświadczenia zdobyte w poprzednich projektach oraz analiza wymagań testów komponentów lotniczych umożliwiły ustalenie poniższych założeń projektowych:

- współpraca z silnikami prądu stałego;
- integracja z wybranym ustawnikiem pozycyjnym;
- zasilanie bateryjne;
- niskie zużycie energii zapewniające długi czas pracy przy zasilaniu bateryjnym;
- praca z częstotliwością mieszczącą się w zakresie 0,1-2 Hz;
- komunikacja bezprzewodowa poprzez BLE;
- wysoka dokładność regulacji (przynajmniej 0,05 l/min).

Analiza sposobu prowadzenia badań pozwoliła wyróżnić dwa typy pracy wykonywanej przez ustawnik pozycyjny, odpowiadające testom długoterminowym (nawet ponad 1 rok) i krótszym testom wydajnościowym (zazwyczaj maksymalnie kilka tygodni). W przypadku testów długoterminowych wymagane jest utrzymywanie stałego poziomu otwarcia zaworu lub zmiana otwarcia w określonym momencie cyklu testowego. W obu sytuacjach napęd po osiągnięciu wymaganego położenia koryguje tylko położenie zaworu w celu utrzymania przepływu, ciśnienia lub temperatury na określonym poziomie. W przypadku krótkich testów wydajnościowych, gdzie sprawdzane są możliwości komponentów w skrajnych warunkach pracy, realizuje się kolejne punkty zaplanowanego programu testu. Każdy kolejny punkt polega na zmianie temperatury, ciśnienia lub przepływu i oczekiwaniu na stabilizację po zmianie nastawy, co trwa od kilku do kilkudziesięciu minut. Zatem dla obu grup testów ustawnik przez większość

czasu pozostaje w bezruchu lub wykonuje krótkie ruchy korygujące. Nietrudno odnaleźć tutaj analogię do sposobu pracy przetwornika projektowanego w rozdziale 4.1, który jest wybudzany tylko na czas wykonania pomiaru i wysłania danych. Tym bardziej, że ustawnik również może oferować funkcje pomiarowe np. w celu określenia poziomu otwarcia zaworu. Zaproponowany sposób sterowania napędu polega na wykonywaniu kroków, pomiędzy którymi napęd jest wyłączany, a pozostałe elementy ustawnika są przełączane w stan uśpienia. Taki sposób sterowania wymaga samohamowności układu, w celu zapewnienia stałego położenia w momencie kiedy napęd nie jest zasilony. Początkowo rozważano wykorzystanie wyłącznie silnika krokowego ze względu na wysoką liczbę uzyskiwanych położeń kątowych, przy prostym sterowaniu. Jednak projektowany układ elektroniczny ma współpracować z ustawnikami pozycyjnymi stosowanymi w Laboratorium Badania Łożysk, gdzie w największym stopniu wykorzystywane są ustawniki z silnikami prądu stałego. Ponadto układy z napędami prądu stałego są powszechnie wykorzystywane w ustawnikach pozycyjnych dostępnych na rynku. W celu zapewnienia kompatybilności z przyszłymi zastosowaniami zostało zaproponowane rozwiązanie łatwe w adaptacji do obsługi innych rodzajów napędów. Bazowym pozycjonerem, który zostanie przeprojektowany jest ustawnik typu HH500 firmy Badger (rys. 4.52). Obec-

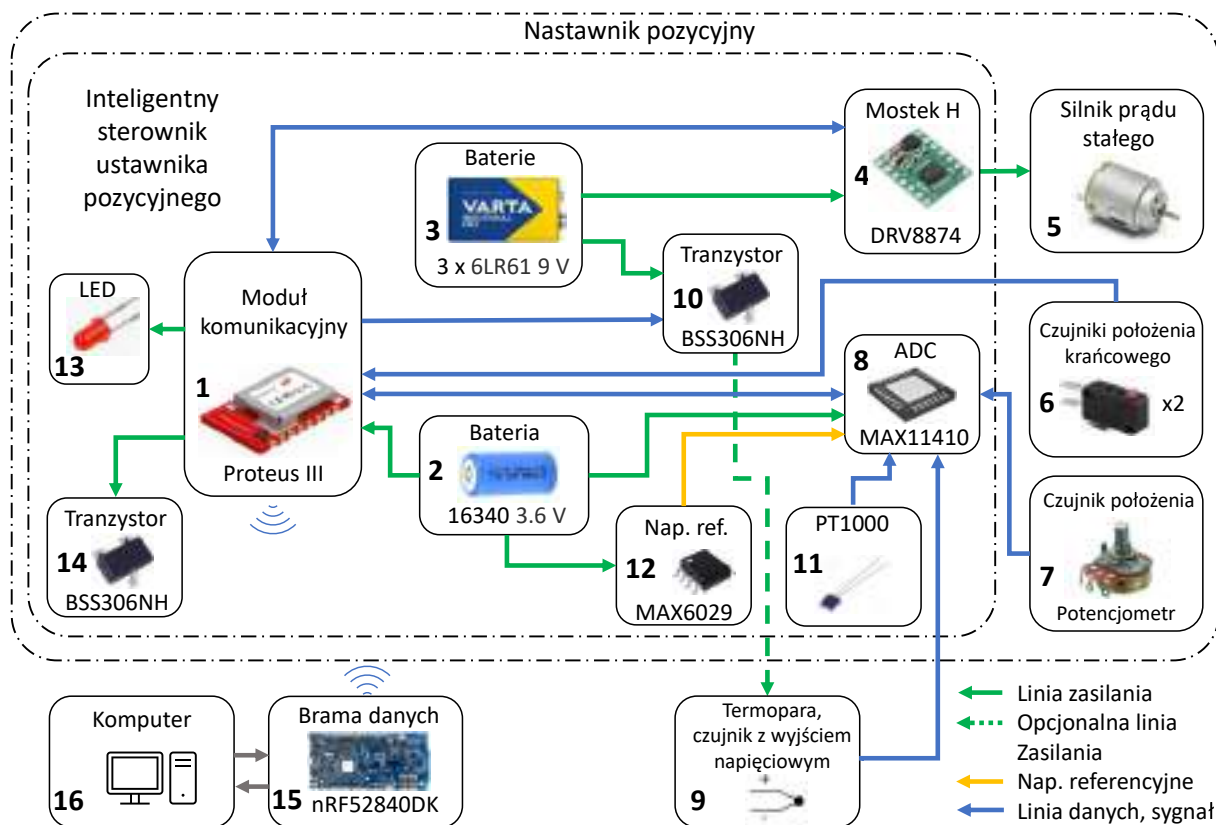


Rysunek 4.52. Ustawniki pozycyjne typu HH500 stosowane w Laboratorium Badania Łożysk

nie w Laboratorium Badania Łożysk jest wykorzystywanych 10 tego rodzaju napędów. Układ posiada regulację położenia z dokładnością do 1 % pełnego otwarcia, co nie jest wystarczające dla wielu kampanii testowych. Przykładem takiego badania może być test pracy łożyska lotniczego przy zredukowanym przepływie oleju smarującego, gdzie od wartości rzędu kilku l/min zmniejsza się stopniowo przepływ, aż do wartości równych dziesiątym, a czasami nawet setnym częściom l/min. Celem prac jest zatem nie tylko zapewnienie mobilności ustawnika poprzez zastosowanie komunikacji bezprzewodowej oraz zasilania bateryjnego, ale również podniesienie dokładności regulacji położenia, przepływu, ciśnienia lub temperatury. Obecnie na rynku trudno jest odszukać ustawniki w pełni spełniające wymagania testów lotniczych pod względem dokładności regulacji.

4.3.2 Struktura systemu

Przeprowadzona analiza wymagań testów w laboratoriach lotniczych oraz możliwości technicznych związanych ze sterowaniem napędami, pozwoliła na zaproponowanie struktury sterownika ustawnika pozycyjnego przedstawionej na rysunku 4.53. Tak samo jak w poprzednich



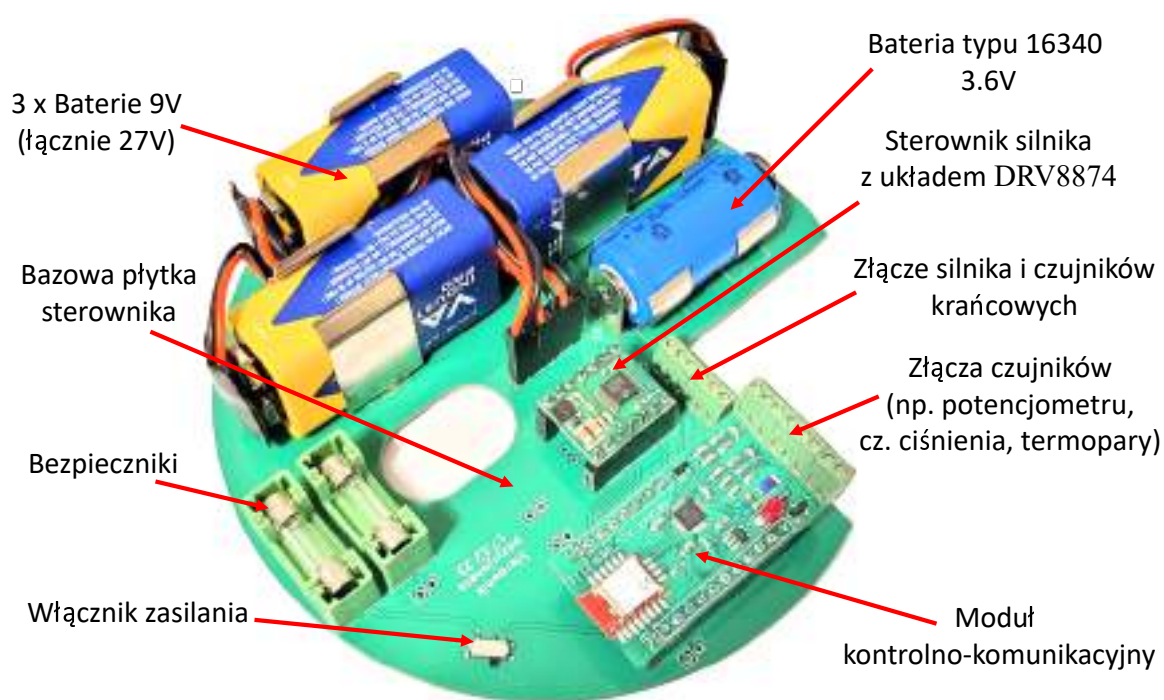
Rysunek 4.53. Zaproponowana struktura sterownika ustawnika pozycyjnego

projektach moduł komunikacyjno-kontrolny (1) odpowiada za obsługę komunikacji BLE i kontrolę pracy pozostałych układów. Część komunikacyjna i pomiarowa urządzenia jest zasilana pojedynczym akumulatorem (2), a część napędowa zestawem baterii połączonych szeregowo (3). Moduł sterownika DRV8874 (4) sterującego pracą silnika (5), jest sterowany liniami EN, PH i SLEEP odpowiadającymi kolejno za włączenie napędu, kierunek obrotów i włączenie trybu oszczędzania energii. Przeprojektowywany ustawnik ma zintegrowane czujniki położenia krańcowego (6) i potencjometr (7) informujące o położeniu grzybka obsługiwanego zaworu. Za pomiar położenia przy pomocy potencjometru odpowiada przetwornik ADC (8). Pomiar rezystancji jest wykonywany na podstawie odniesienia do precyzyjnego rezystora referencyjnego, w sposób opisany w podrozdziale 4.1. Została również zapewniona możliwość obsługi czujników zewnętrznych (9), w taki sam sposób jak w projektowanym wcześniej przetworniku pomiarowym. Tranzystor (10) pozwala na włączanie zasilania zewnętrznych czujników (np. ciśnienia), a rezystancyjny czujnik temperatury (11) na kompensację temperaturową przy pomiarach z termoelektrycznymi czujnikami temperatury. Pomiary napięciowe są wykonywane w odniesieniu do referencyjnego źródła napięcia (12). Dodatkowe pomiary

mogą zostać wykorzystane do stworzenia prostego układu regulacji np. temperatury lub ciśnienia. Do testowania układu i podstawowej komunikacji z użytkownikiem może zostać wykorzystana dioda LED (13). Układ posiada również dodatkowy tranzystor (14) podłączony do jednego z wyprowadzeń. Pomiarów są przesyłane bezprzewodowo do bramy danych (15) i dalej do głównego komputera w laboratorium (16). Taką samą drogą odbywa się również kontrola pracy układu i przesyłanie wartości sygnałów sterujących. W stosunku do wcześniej projektowanego przetwornika pomiarowego została rozszerzona liczba kanałów analogowych i cyfrowych, co wymagało przeprojektowania układu.

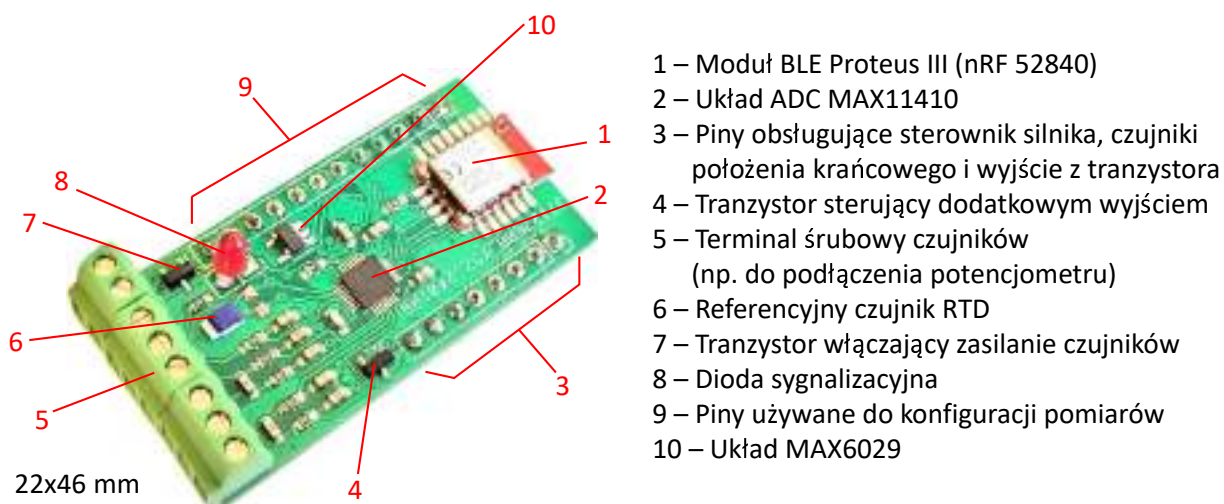
4.3.3 Projekt PCB

Powyżej przedstawione wymagania i założenia projektowe zostały uwzględnione w projekcie sterownika ustawnika (rys 4.54). Projekt został podzielony na trzy moduły: bazowy z akumulatorami zasilającymi (zał. 9 i 10), moduł odpowiadający za kontrolę, pomiary i komunikację (zał. 11 i 12) oraz wybrany moduł sterownika silnika. Bazowy moduł został przygotowany w taki sposób, żeby sterownik mógł zastąpić oryginalną płytkę elektroniczną wybranego pozycjonera, z czego wynikały ograniczenia wymiarowe. Zainstalowanie zaprojektowanego urządzenia wymaga tylko usunięcia płytki PCB sterownika dostarczonej z ustawnikiem, instalacji modułów, przebiecia przewodów silnika oraz przewodów potencjometru i czujników położenia krańcowego dostarczających informację zwrotną o pozycji. Taki sposób projektowania zapewni w przyszłości łatwe dopasowanie do innych pozycjonerów poprzez zmianę kształtu modułu bazowego i zmianę płytki sterownika silnika np. kiedy układ będzie miał pracować z silnikiem krokowym.

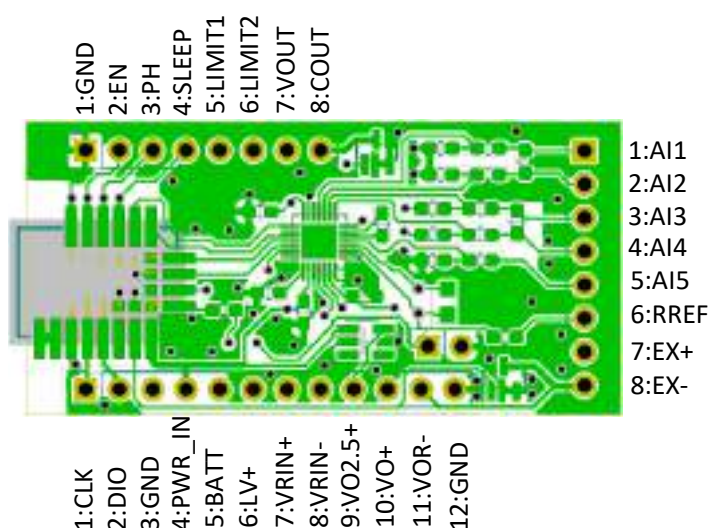


Rysunek 4.54. Zaprojektowany sterownik ustawnika pozycyjnego

Moduł kontrolno-komunikacyjny (rys. 4.55 i 4.56) powstał poprzez przeprojektowanie modułu przetwornika uniwersalnego, przedstawionego w rozdziale 4.1. Zostały dodane wyjścia sterujące kontrolerem oraz wejścia czujników krańcowych. Liczba wejściowych kanałów pomiarowych obsługiwanych przez ADC została rozszerzona do pięciu, żeby umożliwić jednoczesną obsługę potencjometru zapewniającego sprzężenia zwrotne oraz zewnętrznych czujników pomiarowych. Oprócz tranzystora sterującego pracą czujników został również dodany dodatkowy tranzystor pozwalający na sterowanie jednego z wyjść, co może posłużyć do obsługi pomocniczego elementu wykonawczego. Moduł nie posiada złącza baterii i zintegrowanego włącznika zasilania, ponieważ te elementy zostały umieszczone na bazowym PCB. Złącze konfiguracji pomiarów jest identyczne jak w projekcie przetwornika uniwersalnego. Dioda LED została zainstalowana w taki sposób żeby była widoczna również po montażu modułu zasilania bezprzewodowego. Może ona służyć do podstawowej komunikacji z użytkownikiem.



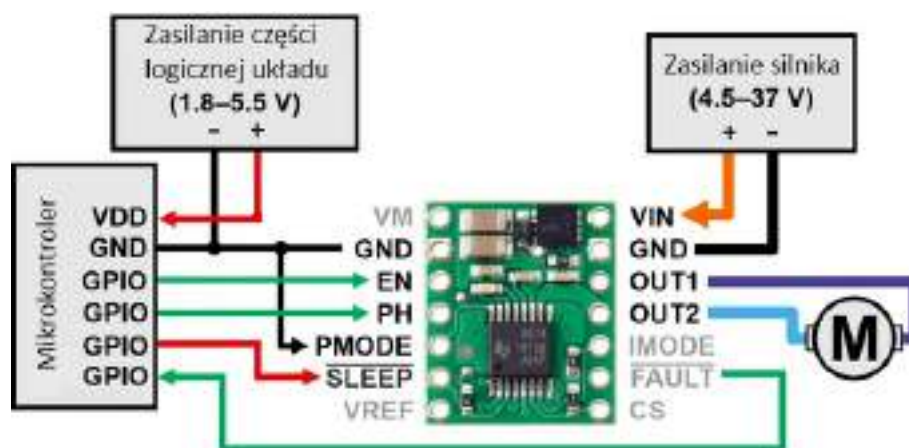
Rysunek 4.55. Moduł kontrolno-komunikacyjny



Rysunek 4.56. Opis wyprowadzeń modułu kontrolno-komunikacyjnego

4.3.4 Sterowanie pracą silnika

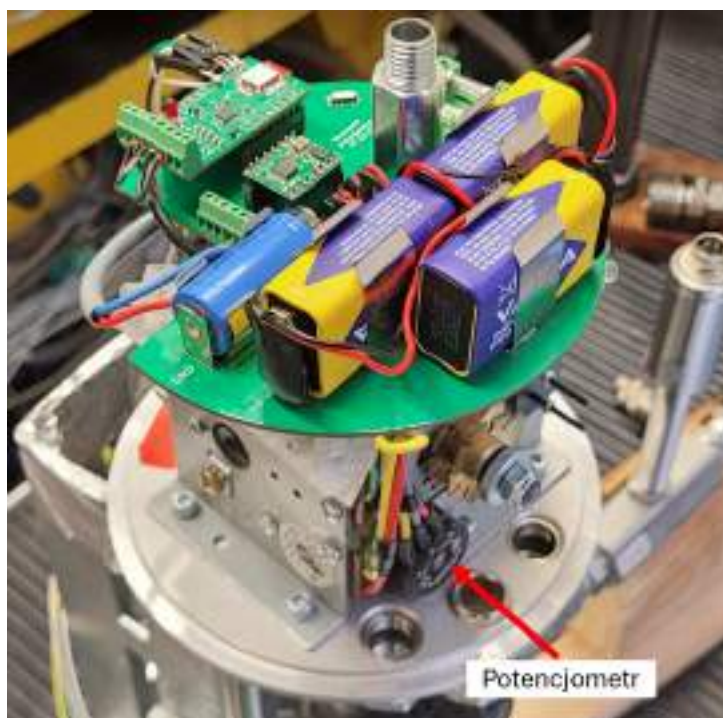
Moduł PCB odpowiedzialny za pomiary, komunikację i generowanie sygnałów sterujących jest przystosowany do współpracy z różnego rodzaju kontrolerami silników. W przypadku omawianych silników prądu stałego za zmianę kierunku obrotów silnika odpowiada moduł z układem scalonym DRV8874 firmy Texas Instruments. Może on być również wykorzystany do wzmocnienia sygnału PWM (ang. pulse-width modulation), gdy występuje konieczność sterowania prędkością obrotów silnika, jednak ta opcja nie została wykorzystana w projekcie. Napięcie zasilania podczas trwania każdego kroku będzie zatem stałe, a zmieniała się będzie tylko średnia prędkość ruchu, w zależności od częstotliwości kroków. Jest to układ ze zintegrowanym mostkiem H dedykowany do obsługi napędów, który może być zasilany napięciem od 4,5 V do 37 V, przy maksymalnym prądzie ciągłym do 2,1 A i chwilowym do 6A (przez sekundę). Część logiczna układu jest przystosowana do pracy z napięciem w zakresie 1,8-5,5V, co jest korzystne pod względem zastosowania zasilania bateryjnego, przy którym napięcie zmienia się wraz z procesem rozładowania. Układ jest wyposażony w zabezpieczenia przed odwróconą polaryzacją, zbyt niskim napięciem, zbyt wysoką temperaturą oraz zbyt dużym prądem. Do obsługi układu wymagane są tylko trzy wyprowadzenia mikrokontrolera podłączone do wejść EN i PH oraz SLEEP (rys. 4.57). Wejście EN aktywuje napęd. Ma również możliwość przyjmowania przebiegu o zmiennym wypełnieniu (nie użyte w projekcie). Złącze PH pozwala na sterowanie kierunkiem obrotów silnika. Odpowiada za przełączenie wbudowanego w układ mostka typu H. Układ DRV8874 ma również możliwość pracy w trybie uśpienia, w którym pobór prądu spada poniżej 1 μ A. Po włączeniu zasilania układ pracuje domyślnie w trybie uśpienia i do wyjścia z niego jest wymagane podanie stanu wysokiego na wejście SLEEP. Moduł ma również możliwość niezależnego sterowania dwoma obciążeniami i kontroli hamowania silnika, ale w projekcie nie było potrzeby wykorzystania takich funkcji. Do wyboru trybu pracy służy wejście PHMODE. Jest możliwa komunikacja zwrotna z układu poprzez wyjście FAULT informujące o wystąpieniu błędu oraz analogowe wyjście IMODE informujące o aktualnym prądzie silnika.



Rysunek 4.57. Sposób obsługi modułu sterownika silnika z układem DRV8874

4.3.5 Funkcje pomiarowe ustawnika pozycyjnego

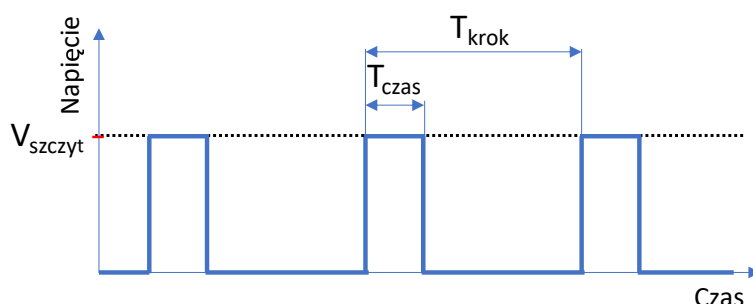
Sterownik ustawnika pozycyjnego został wyposażony w te same funkcje, co przedstawiony w rozdziale 4.1 przetwornik inteligenty. Zatem może on współpracować z różnego rodzaju czujnikami stosowanymi w laboratoriach. W przypadku regulacji pozycji grzybka zaworu układ może korzystać z wbudowanego potencjometru, zainstalowanego na kole zębatym przekładni ustawnika pozycyjnego (rys. 4.58). Pomiar rezystancji odbywa się przez odniesienie do dokładnego rezystora referencyjnego, tak jak jest to opisane w podrozdziale 4.1.5. Prąd wygenerowany przez układ ADC typu MAX11410 płynie przez oba oporniki, a napięcie na rezystorze referencyjnym staje się źródłem napięcia odniesienia dla przetwornika mierzącego spadek napięcie na rezystorze pomiarowym. W ten sposób można kontrolować stopień otwarcia zaworu. Istnieje również możliwość obsługi zewnętrznych czujników w sposób przewodowy i bezprzewodowy. W ten sam sposób, co we wcześniej przedstawianym przetworniku mobilnym, można obsłużyć termoparę, rezystancyjny czujnik temperatury, tensometr lub czujnik z wyjściem napięciowym np. czujnik ciśnienia. Układ posiada wbudowany czujnik PT1000 do kompensacji podczas używania termopar oraz tranzystor załączający zasilanie tensometru lub czujnika zintegrowanego z wyjściem napięciowym. Istnieje również możliwość podłączenia przetworników pomiarowych w sposób bezprzewodowy, bezpośrednio do układu sterownika pozycjonera lub poprzez bramę danych zbierającą informacje z całego systemu. Jako element pomiarowy może zostać wykorzystany uniwersalny przetwornik bezprzewodowy, który został przedstawiony w poprzednim rozdziale. Jest to szczególnie wygodne wtedy kiedy punkt pomiarowy znajduje się w znacznej odległości od sterownika ustawnika pozycyjnego.



Rysunek 4.58. Zaprojektowany sterownik zainstalowany na ustawniku pozycyjnym

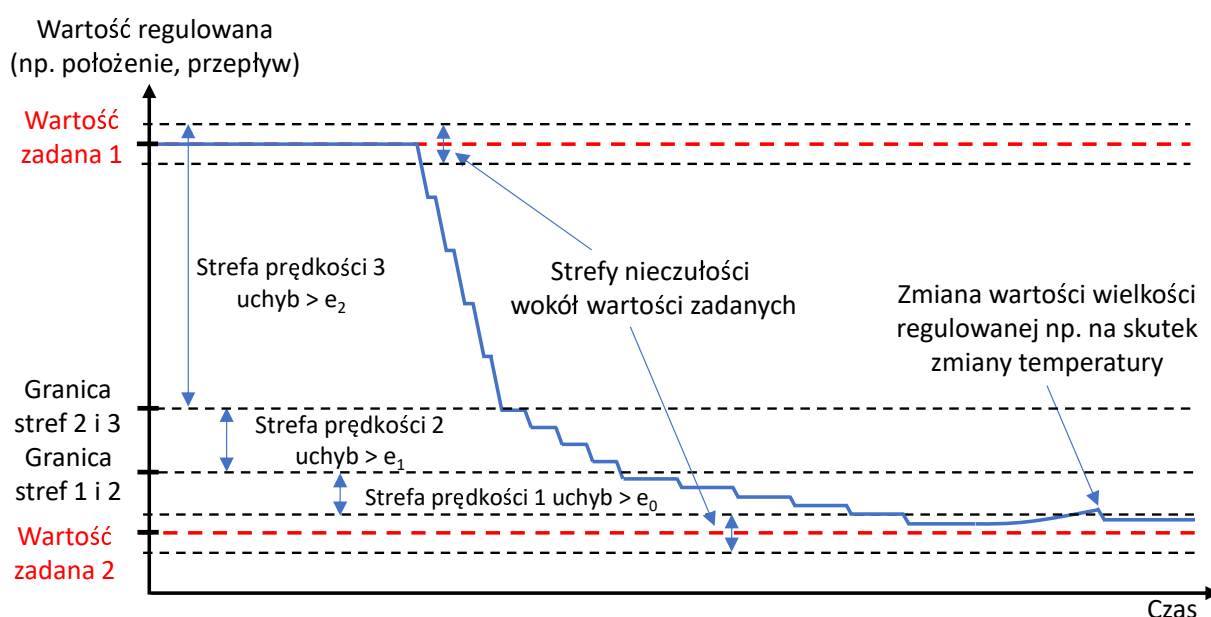
4.3.6 Układ regulacji

Głównym celem stawianym względem układu regulacji podczas procesu projektowania było osiągnięcie jak najniższego zużycia energii, przy jak najwyższej dokładności pozycjonowania. Niskie zużycie energii ma zapewnić możliwość pracy w sieci bezprzewodowej i długi czas pracy napędu. Przyjęta metodologia sterowania silnika prądu stałego jest zbliżona do działania silnika krokowego i polega na wykonywaniu kroków, w określonych odstępach czasowych, pomiędzy którymi napęd nie pracuje. Tutaj jednak przesunięcie kątowe podczas jednego kroku jest zależne od czasu trwania kroku ustawianego parametrem T_czas . Częstotliwość kroków jest zależna od parametru T_krok , będącego okresem pomiędzy kolejnymi krokami (rys. 4.59).



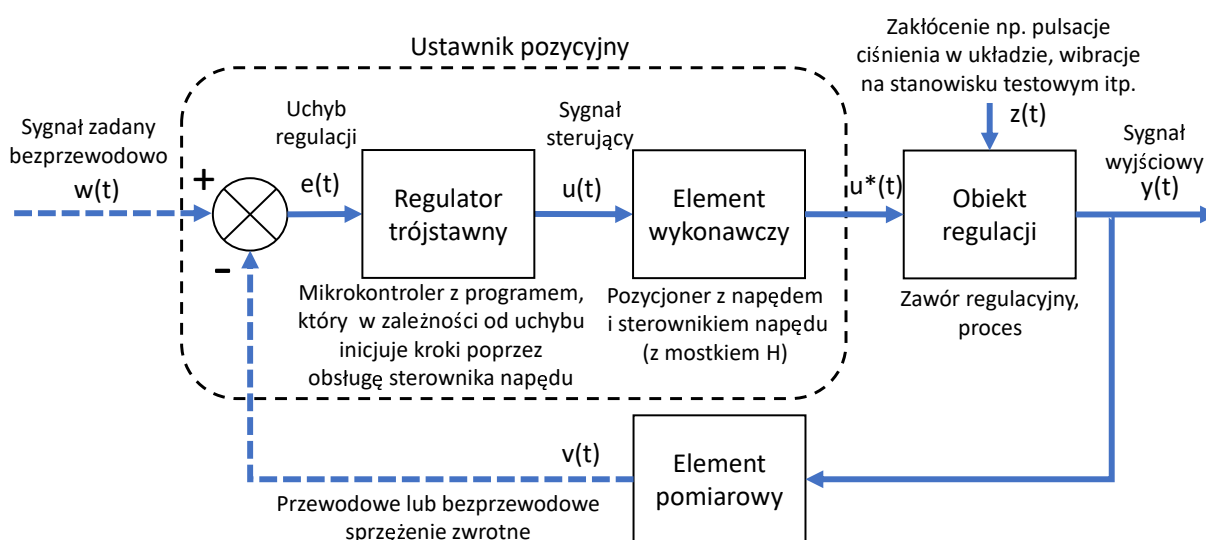
Rysunek 4.59. Sposób kontroli napięcia podawanego na silnik podczas sterowania

Częstotliwość kroków jest zmieniana w zależności od wielkości uchybu regulacji, będącego różnicą pomiędzy wartością zadaną dla regulatora, a wartością mierzoną pełniącą funkcję sprzężenia zwrotnego (rys. 4.60). Ustalenie zakresu uchybu, dla którego ustawnik nie wykonuje ruchu jest istotne ze względu na potencjalne problemy z oscylacjami w pobliżu wartości zadanej. Przed rozpoczęciem każdego kroku układ otrzymuje bezprzewodowo wartość zadaną



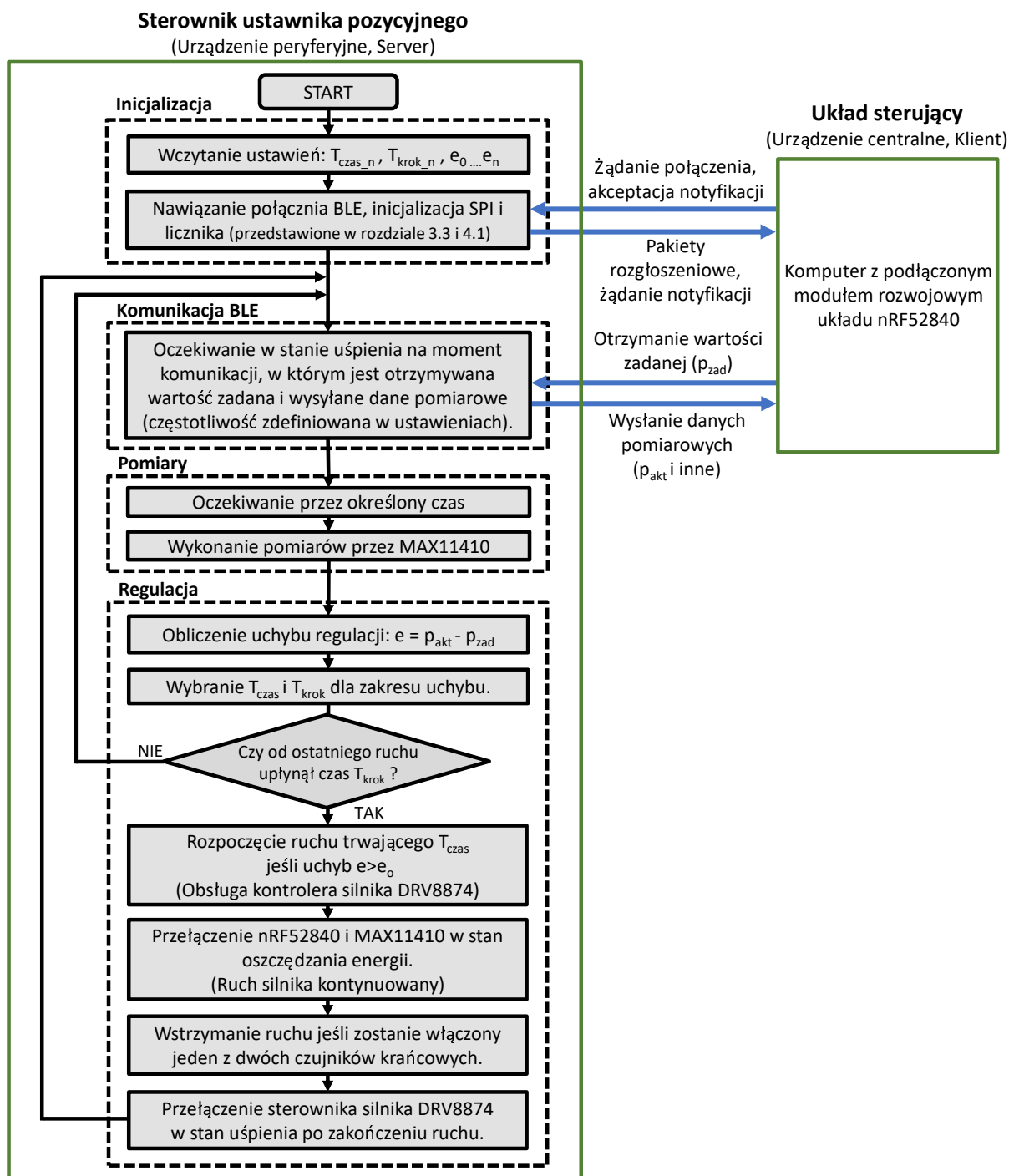
Rysunek 4.60. Przykładowy planowany przebieg regulacji dla trzech stref prędkości ruchu

ze współpracującego z nim urządzenia nadrzędnego. Urządzenie zostaje zatem wybudzone ze stanu oszczędzania energii, w celu otrzymania wartości zadanej i wykonania na tej podstawie kroków, o czasie trwania i częstotliwości wynikających z zakresu do jakiego jest przyporządkowany aktualny uchyb regulacji. Kierunek wykonywania kroku zależy od znaku uchybu regulacji. Krokowa praca ma również pozytywny wpływ na proces regulacji, ponieważ po każdej zmianie położenia suwaka pozycjonera kontrolowany proces potrzebuje czasu na ustabilizowanie fizycznych parametrów np. ustabilizowanie temperatury łożysk po zmianie przepływu oleju smarującego. Zbyt szybki ruch napędu mógłby powodować oscylacje wynikające z braku czasu na odpowiedź regulowanego układu. Ponadto urządzenia pomiarowe mają również określony czas przetwarzania, czego dobrym przykładem są przepływomierze turbinowe, które generują sygnał na podstawie zliczonych impulsów. Czas pomiędzy kolejnymi krokami nie powinien być krótszy niż czas przetwarzania układu pomiarowego. Niedotrzymanie tego warunku również może wprowadzić dodatkowe oscylacje podczas procesu regulacji. Przygotowany układ regulacji można przedstawić w sposób przedstawiony na rysunku 4.61. Przyjęto, że najkrótszy możliwy do ustawienia czas pomiędzy włączeniami napędu jest równy



Rysunek 4.61. Schemat zaproponowanego układu regulacji (np. położenia, przepływu)

czasowi pomiędzy kolejnymi połączeniami poprzez BLE (skonfigurowanemu w ustawieniach połączenia), a kolejne wyższe czasy możliwe do ustawienia są jego wielokrotnościami. Dla częstotliwości ruchów mniejszych od maksymalnej komunikacja poprzez BLE odbywa się kilka razy w czasie pomiędzy kolejnymi krokami. Zasada działania programu sterownika ustawnika została przedstawiona na schemacie (rys. 4.62). Zaproponowane podejście jest proste, bardzo uniwersalne i daje wysoką dokładność regulacji przy zmianie nastawy pomiędzy punktami testowymi, wykonywanymi w ustalonych, ustabilizowanych warunkach. Przy testach wymagających bardziej dynamicznej regulacji lub podążania za krzywą, zastosowany sposób regulacji może nie być odpowiedni. Przy większości testów wykonuje się jednak tylko ruchy pomiędzy kolejnymi ustalonymi punktami tabeli testowej, gdzie oczekuje się na stabilizację

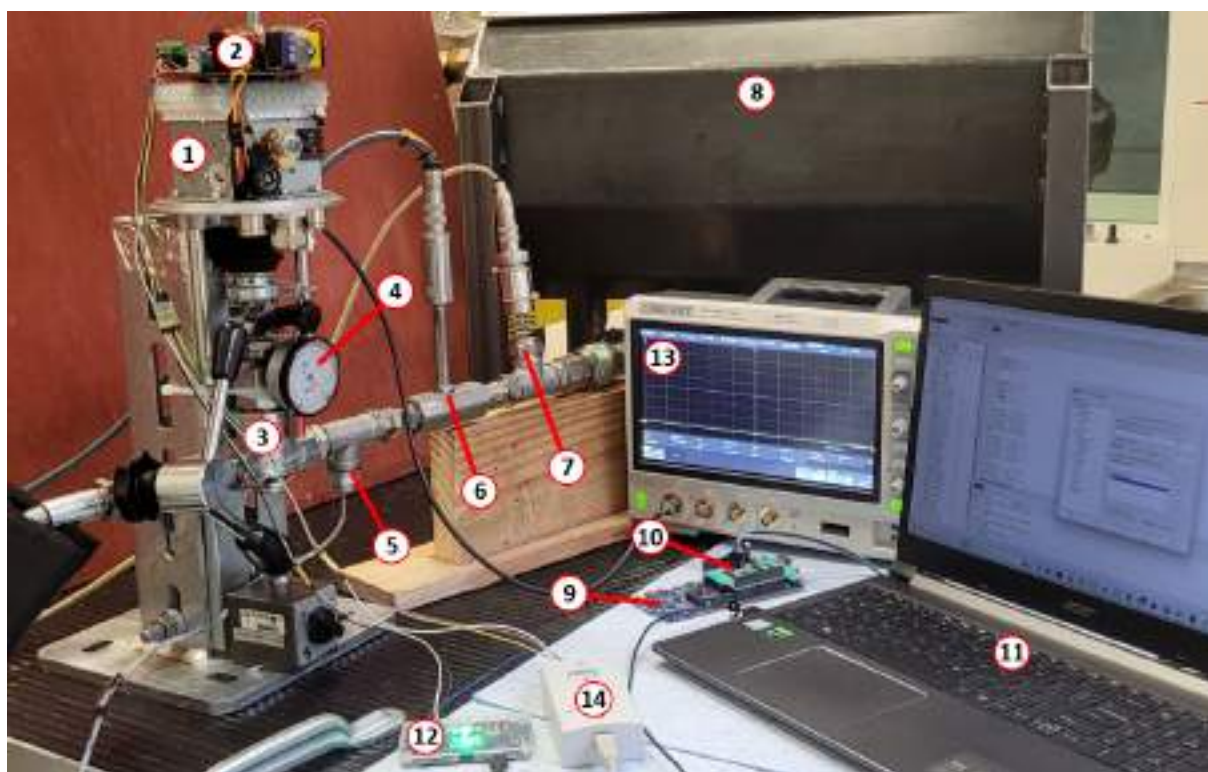


Rysunek 4.62. Schemat przedstawiający zasadę działania programu sterownika ustawnika

warunków. Jest to również sterowanie korzystne z punktu widzenia oszczędzania energii, ponieważ napęd przez większość czasu pozostaje w spoczynku. Układ DRV8874 jest w stanie uśpienia zawsze gdy napęd nie wykonuje ruchu. Układy nRF52840 i MAX11410 są przełączane w stan uśpienia pomiędzy operacjami oraz po wygenerowaniu sygnału kroku, tak żeby podczas ruchu silnika pozostawać w stanie uśpienia. Czas trwania kroku jest ustalany przez licznik czasu aktywny również w stanie uśpienia więc wyjście sterujące pracą kontrolera silnika może być podtrzymywane przez określony czas, pomimo przełączenia mikrokontrolera w stan uśpienia.

4.3.7 Badania zaprojektowanego sterownika

Badania sterownika ustawnika pozycyjnego polegały na sprawdzeniu zużycia energii oraz właściwości funkcjonalnych i regulacyjnych zaproponowanego rozwiązania. W tym celu został przygotowany układ testowy przedstawiony na rysunku 4.63. Na stanowisku badawczym w Laboratorium Badania Łożysk został zainstalowany ustawnik pozycyjny (1) z zainstalowanym zaprojektowanym sterownikiem (2). Ustawnik współpracuje z zaworem o przyłączu 1/2" o charakterystyce liniowej (3) i skoku równym 16 mm, przy ciśnieniu wejściowym oleju równym 35 bar. Zostały podłączone przewody silnika oraz przewody potencjometru i czujników krańcowych. Wskazania pozycji za pomocą potencjometru zostały odpowiednio przeskalowane, ustawiając zawór ręcznie w położeniach krańcowych, w których zostają włączone czujniki krańcowe. Został również zainstalowany czujnik zegarowy (4) pozwalający na pomiar przemieszczenia suwaka zaworu z dokładnością do 0,001 mm w zakresie do 5 mm. Obok zaworu znajdowała się termopara (5), przepływomierz turbinowy (6) oraz czujnik ciśnienia (7). Olej z przygotowanej instalacji testowej trafiał do zbiornika (8), skąd był odpompowywany z powrotem do głównego zbiornika oleju. Na podstawie prędkości obrotowej obracającej się turbinki oraz sygnału z termopary przetwornik generuje na wyjściu sygnał napięciowy proporcjonalny do wielkości przepływu. W przeprowadzonych testach źródłem sprzężenia zwrotnego układu regulacji był pomiar położenia grzybka zaworu oraz wartość przepływu, w zależności od wykonywanego badania. Potwierdzono jednak współpracę sterownika z czujnikiem ciśnienia i termoparą. Są one obsługiwane w taki sam sposób



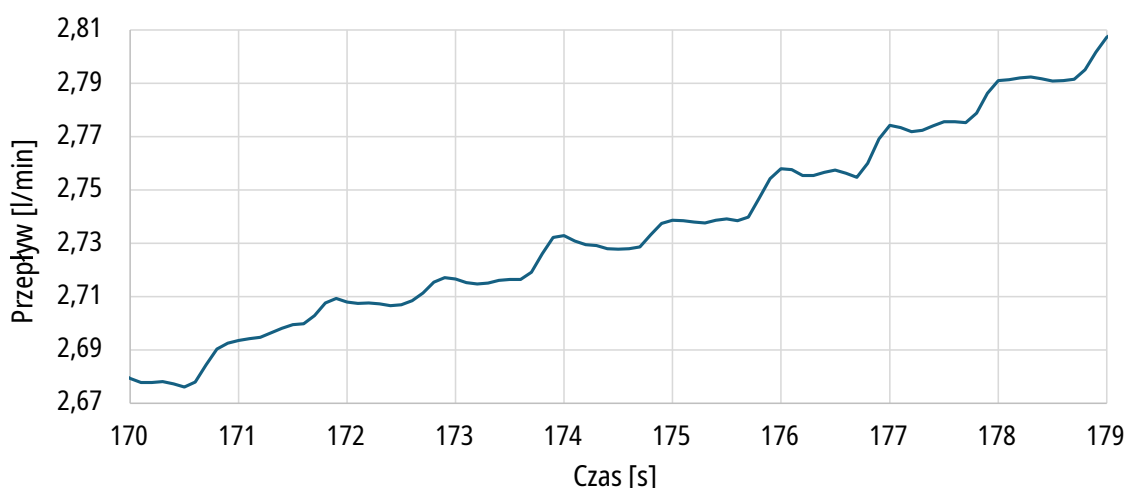
Rysunek 4.63. Stanowisko przygotowane do testów regulacji

jak przedstawiono w rozdziale 4.1. Daje to możliwość budowy układów regulacji ciśnienia i temperatury bez wykorzystania dodatkowych systemów sterujących. W przypadku regulacji ciśnienia czujnik był zasilany z wyjścia zasilanego poprzez tranzystor. Rolę punktu centralnego sieci komunikującego się podczas testów ze sterownikiem ustawnika pełnił moduł rozwojowy nRF52840DK (9), z zainstalowanym modułem rozwojowym układu MAX11410 (10) mierzącym napięcie na wyjściu przetwornika przepływowierza. Informacja o aktualnym przepływie mogła być zatem udostępniana bezprzewodowo, co zostało wykorzystane w testach regulacji przepływu. W każdym przypadku testowym dane pomiarowe były dostępne na komputerze (11) w aplikacji terminalowej, poprzez połączenie z modułem rozwojowym układu nRF52840DK. Z programu możliwe było również wysyłanie wartości zadanych aktualnie sterowanej wielkości. Do pomiaru prądu części modułu komunikacyjnego wykorzystano układ nRF Power Profiler Kit II (12), a do pomiaru prądu części napędowej oscyloskop (13) mierzący spadek napięcia na rezystorze o małej wartości wpiętym szeregowo ze sterownikiem silnika. Podczas testów program wraz z kolejnymi testowanymi ustawieniami był wgrywany poprzez programator (14).

Badania kontroli przy wykonywaniu kroku ruchu na żądanie operatora

W niektórych badaniach lotniczych wymagających szczególnej precyzji korzystanie w pełnym zakresie pracy z automatycznej regulacji otwarcia zaworu, przepływu lub ciśnienia może nie być optymalnym rozwiązaniem. Szczególnie w testach gdzie zmiana tych parametrów jest tylko środkiem do zbadania zmian w innym obszarze stanowiska testowego lub obiektu badań, a wprowadzenie minimalnej zmiany pozwala na oszacowanie odpowiedzi badanego układu lub zbliżenie się do wartości granicznej. Przy regulacji automatycznej niewystarczająca dokładność pomiaru regulowanej pozycji grzybka zaworu, przepływu lub ciśnienia mogłaby uniemożliwić precyzyjne ustawienie warunków punktu testowego. Występują również testy, w których niedopuszczalne jest automatyczne doregulowywanie układu, ponieważ może to zaburzyć testowany proces. Przykładem takiej sytuacji może być test uszczelnienia gdzie istotne jest ustawienie precyzyjnej wartości wejściowej ciśnienia lub przepływu, a następnie badane jest pogarszanie się parametrów w wyniku zużycia. Z tego względu umożliwiono wykonywanie kroku będącego wielokrotnością minimalnego kroku na bezpośrednie żądanie operatora. Po stronie aplikacji kontrolującej może to zostać zorganizowane poprzez udostępnienie operatorowi dwóch przycisków odpowiedzialnych za wykonanie kroku w stronę zamykania lub otwierania zaworu i pola do wpisywania liczby określającej wielokrotność minimalnego kroku. Przykład takiego interfejsu przedstawiono w podrozdziale 4.5.3. Za najwyższą możliwą do uzyskania w danej konfiguracji sprzętowej rozdzielczość pozycjonowania grzybka zaworu (odpowiadającą jednemu krokowi) przyjęto 0,00375 %, co przekłada się na 0,0006 mm ruchu suwaka pozycjonera i zostało potwierdzone czujnikiem zegarowym (wykonano 1000 kroków i uśredniono pomiar). Oczywiście w układzie występują luzy mechaniczne redukujące dokładność kontroli przy zmianie kierunku ruchu, nie przeszkodziły one jednak w uzyskaniu wysokiej rozdzielczości.

W testowanej konfiguracji wykonanie minimalnego kroku daje efekt w postaci zmiany wskazania przepływu o około 0,004 l/min. Podana rozdzielczość kontroli przepływu ma jednak charakter tylko orientacyjny ponieważ zmienia się wraz ze zmianą konfiguracji stanowiska testowego. Ponadto szum sygnału znacznie zakłóca odczyt tak małych zmian wartości dla czujników o znacznie większym zakresie. Wskazana maksymalna rozdzielczość kontroli pozycji odpowiada czasowi włączenia napędu T_{czas} równemu 5 ms i jest wybrana na podstawie pomiarów wykonanych dla pełnego zakresu ruchu grzybka zaworu. Przy takim kroku oś silnika wykonuje wtedy ruch o około 30°, a wysoka rozdzielczość pozycjonowania liniowego jest efektem przekładni o wysokim przełożeniu. Dla czasu T_{czas} równego 10 ms uzyskiwano rozdzielczość na poziomie 0,002 mm i 0,0125 % otwarcia. W większości przypadków nie jest jednak potrzebna aż tak wysoka dokładność kontroli, również ze względu na ograniczoną dokładność pomiarową czujników. Wartością graniczną czasu włączenia napędu poniżej której ustawnik nie zawsze był w stanie wykonać ruch zaworem, przy danym medium i ciśnieniu w instalacji jest czas równy 2 ms. Dla tej wartości był już obserwowany niewielki ruch, jednak jego zakres był mocno niepowtarzalny. W celu uzyskania pewnego zapasu i wyższej powtarzalności ruchu przyjęto wartość 2,5 razy większą. Dla 5 ms napęd może pracować w całym zakresie 0-100 %, również w pobliżu położzeń krańcowych, a ruch suwaka nie jest zauważalny gołym okiem. Umożliwienie dokładnej kontroli pozycji, przepływu lub ciśnienia w tak szerokim zakresie, od rozszczelnienia zaworu do pełnego otwarcia, jest nieosiągalne dla rozwiązań obecnie dostępnych na rynku. Korekta stopnia otwarcia zaworu, wielkości przepływu lub ciśnienia może zostać również wykonana wewnątrz strefy zerowej prędkości ruchu regulatora, co znacznie zwiększa możliwości ustawnika również przy automatycznej regulacji. Na rysunku 4.64 przedstawiono zmianę przepływu będącą efektem wykonania serii kroków z częstotliwością 1 Hz i czasem T_{czas} równym 25 ms. Dla 5 ms zmiany były porównywalne z poziomem szumu na sygnale przepływomierza i przez to trudne do zademonstrowania. Podana wcześniej maksymalna rozdzielczość kontroli pozycji i przepływu została obliczona poprzez uśrednienie pomiaru składającego się z wielu kroków.



Rysunek 4.64. Zmiany przepływu dla kroku T_{czas} równym 25 ms

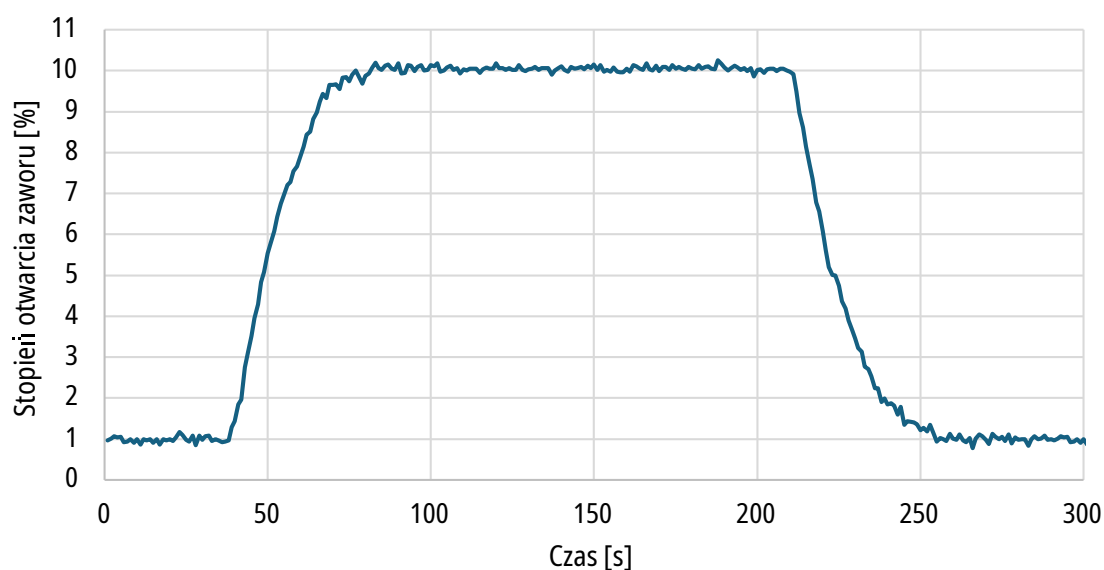
Badania automatycznej regulacji pozycji grzybka zaworu

W pierwszym badaniu automatycznej regulacji sprawdzono dokładność pozycjonowania przy sterowaniu pozycją grzybka zaworu. Rolę sprzężenia zwrotnego dla regulatora pełniła zmiana rezystancji potencjometru podłączonego do sterownika. Podczas testów automatycznej regulacji wybrano przykładowe ustawienia zapewniające stabilną i szybką pracę zebrane w tabeli 4.5. Zostało zaproponowanych pięć zakresów przełączanych względem wartości uchybu, zgodnie z przyjętym algorytmem regulacji. Każdy zakres jest opisany poprzez wartość uchybu określającą punkt przełączenia zakresu oraz czas trwania i częstotliwości kroków.

	Punkt przełączenia e	Czas włączenia T_{czas}	Okres pomiędzy włączeniami T_{krok}
Zakres 1	$e_0 = 0,1\%$	15 ms	2 s
Zakres 2	$e_1 = 0,3\%$	50 ms	2 s
Zakres 3	$e_2 = 1 \%$	75 ms	1 s
Zakres 4	$e_3 = 2 \%$	100 ms	1 s
Zakres 5	$e_4 = 5 \%$	200 ms	1 s

Tabela 4.5. Ustawienia dobrane podczas testu regulacji położenia grzybka zaworu

Na rysunku 4.65 przedstawiono zmianę pozycji dla zmiany wartości zadanej z 1 do 10 %, obejmującej wszystkie powyżej zestawione strefy prędkości ruchu. Pomimo tego, że mechanika układu oraz sposób sterowania napędu pozwala na uzyskanie rozdzielczości pozycjonowania na bardzo wysokim poziomie (dla niskich wartości T_{czas}), to dokładność potencjometru nie pozwala na automatyczną regulację z dokładnością odpowiadającą minimalnemu krokowi ruchu. Obecnie maksymalna rozdzielczość wykonywanych kroków jest wyższa niż rozdzielczość pomiaru pozycji przy pomocy zintegrowanego potencjometru. Zatem dla automatycznej regula-



Rysunek 4.65. Przebieg zarejestrowany podczas automatycznej regulacji położenia w zakresie 1-10%

cji pozycji przyjęto szerokość zakresu braku ruchu wokół pozycji zadanej jako równą $\pm 0,1\%$, co określa jednocześnie uzyskaną dokładność regulacji położenia na poziomie $\pm 0,016\text{ mm}$. Dla wyższych dokładności regulator miał problemy ze stabilizacją ze względu na niewystarczającą dokładność pomiaru pozycji. Badanie pokazuje również, że przy zastosowaniu czujnika położenia wyższej klasy można byłoby uzyskać wyższe dokładności automatycznej regulacji położenia grzybka zaworu na poziomie $\pm 0,00375\%$ (dla $T_{\text{czas}} = 5\text{ ms}$). Jak wspomniano wcześniej operator ma możliwość wykonania kroku o ustalonym czasie trwania wewnątrz strefy zerowej prędkości ruchu regulatora, pomimo aktywnego trybu regulacji automatycznej. Może to zostać wykorzystane do dostrojenia warunków punktu testowego np. kiedy za pomocą kontroli położenia grzybka zaworu chcemy ustalić dokładną wartość temperatury testowanego łożyska lub ciśnienia w obszarze głowicy testowej, a nie jest to w pełni możliwe przy wykorzystaniu regulacji automatycznej.

Badania automatycznej regulacji przepływu

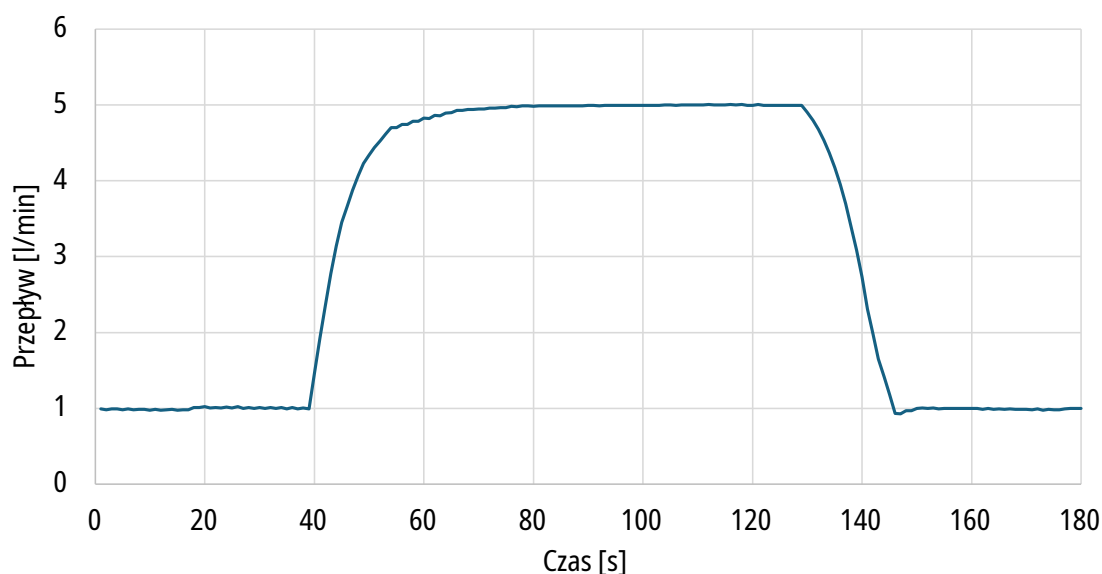
W drugim badaniu regulacji automatycznej źródłem sprzężenia zwrotnego dla pozycjonera był pomiar przepływu udostępniony bezprzewodowo poprzez połączenie BLE, tą samą drogą co wartość zadana dla regulatora. W tym wypadku wartość zadana mogła być podawana bezpośrednio jako wartość oczekiwanego przepływu. Tak samo jak dla regulacji położenia przyjęto pięć stref prędkości ruchu przedstawionych w tabeli 4.6. Do badań przejęto strefę

	Punkt przełączenia e	Czas włączenia T_{czas}	Okres pomiędzy włączeniami T_{krok}
Zakres 1	e0 = 0,01 l/min	30 ms	2 s
Zakres 2	e1 = 0,1 l/min	100 ms	2 s
Zakres 3	e2 = 0,4 l/min	200 ms	1 s
Zakres 4	e3 = 1 l/min	300 ms	1 s
Zakres 5	e4 = 2 l/min	400 ms	1 s

Tabela 4.6. Ustawienia dobrane podczas testu regulacji przepływu

nieczułości względem wartości zadanej przez operatora równą $\pm 0,01\text{ l/min}$. Szerokość strefy nieczułości ma wpływ nie tylko na dokładność regulacji, ale również na oszczędzanie energii. Węższe strefy nieczułości powodowały częstsze ruchy napędu w celu doregulowania, ze względu na oscylacje wartości mierzonej. Przepływ oleju zmienia się również mocno w zależności od temperatury. Krokowa praca napędu wpływała pozytywnie na proces regulacji ponieważ kontrolowany proces ma czas na ustabilizowanie. Szerokość strefy nieczułości i wynikająca z niej dokładność pozycjonowania musi jednak zostać każdorazowo dobrana do aktualnie kontrolowanego procesu. Badania pokazały jednak, że nie jest to zadaniem trudnym. Na rysunku 4.66 przedstawiono przebiegi uzyskane przy zmianie przepływu z 1 do 5 litrów/minutę. Podobnie jak przy regulacji położenia rozdzielczość automatycznej regulacji przepływu jest ograniczona przez dokładność czujnika pomiarowego, tutaj pomiar charakteryzuje się jednak znacznie

mniejszym szumem. Przepływ będzie się jednak zmieniał w czasie na skutek wygrzewania układu lub innych parametrów testu, co będzie stwarzało konieczność doregulowań. Uzyskana dokładność automatycznej regulacji przepływu oleju wielokrotnie przekracza możliwości dostępnych na rynku ustawników pozycyjnych. Jeśli jednak operator testu potrzebuje jeszcze wyższej dokładności kontroli otwarcia zaworu to ma możliwość wykonania minimalnego kroku w trybie sterowania ręcznego. Badania pokazały pewną asymetrię w prędkości regulacji przy zamykaniu i otwieraniu zaworu. Dla tych samych nastaw zawór przy otwieraniu zbliżał się znacznie łagodniej do wartości zadanej niż przy zamykaniu. Jest to najprawdopodobniej związane ze sposobem działania przepływomierza oraz typem zaworu i może zostać w łatwy sposób wyeliminowane wprowadzając oddzielne nastawy regulacji dla dwóch kierunków ruchu.

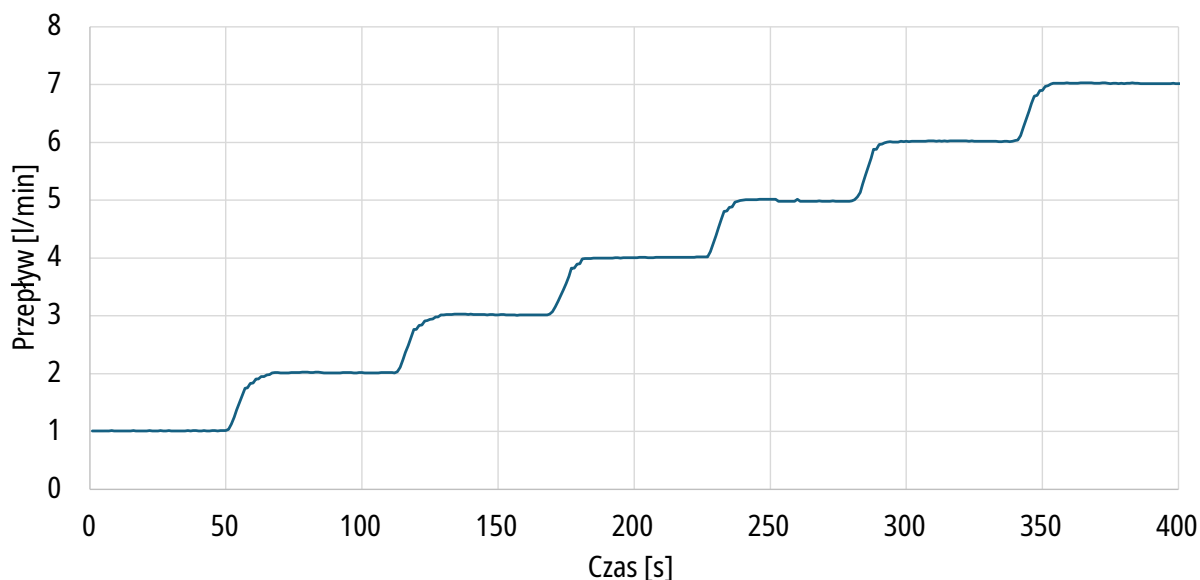


Rysunek 4.66. Przebiegi zarejestrowane podczas zmiany wart. zadanej z 1 do 5 l/min

Zużycie energii podczas regulacji automatycznej

Zużycie energii części napędowej układu jest mocno zależne od liczby i zakresu zmian wartości zadanych. W związku z tym konieczne było wybranie przypadku testowego dobrze reprezentującego badania wykonywane w laboratoriach testujących komponenty lotnicze. Jako reprezentatywny przypadek testowy przyjęto wykonywanie zmian o 1 l/min w odstępach co 10 minut. Takie kolejne zmiany przepływu są zbliżone do punktów tabel testowych łożysk silników odrzutowych lub wymienników ciepła. Punkty zostały rozłożone tak żeby sześć punktów tabeli testowej mogło zostać wykonane w godzinę, co jest bliskie rzeczywistym czasom testów. Czasy pomiędzy kolejnymi zmianami przepływu odpowiadają czasom stabilizacji parametrów na stanowisku testowym przed wykonaniem pomiarów. Zmiana przepływu o 1 l/min dla przedstawionego wcześniej stanowiska testowego odpowiada zmianie procentowego otwarcia zaworu o 0,95 %, co przekłada się na 0,1523 mm liniowego ruchu grzybka zaworu. Jak wskazano wcześniej z uwagi na zbyt małą dokładność pomiarów przy

pomocy potencjometru nie jest możliwa automatyczna regulacja pozycji z rozdzielczością większą niż 0,1 % pełnego otwarcia, co mogłoby nie być wystarczające. Z tego względu zdecydowano się na oszacowanie zużycia energii podczas regulacji przepływu, która oferuje rozdzielczość regulacji na poziomie 0,01 l/min. Dla zademonstrowania charakteru zmian w pełnym teście trwającym godzinę, na rysunku 4.67 przedstawiono test składający się z takich samych kolejnych wartości zadanych, ale wykonanych w skróconym czasie. Wcześniej

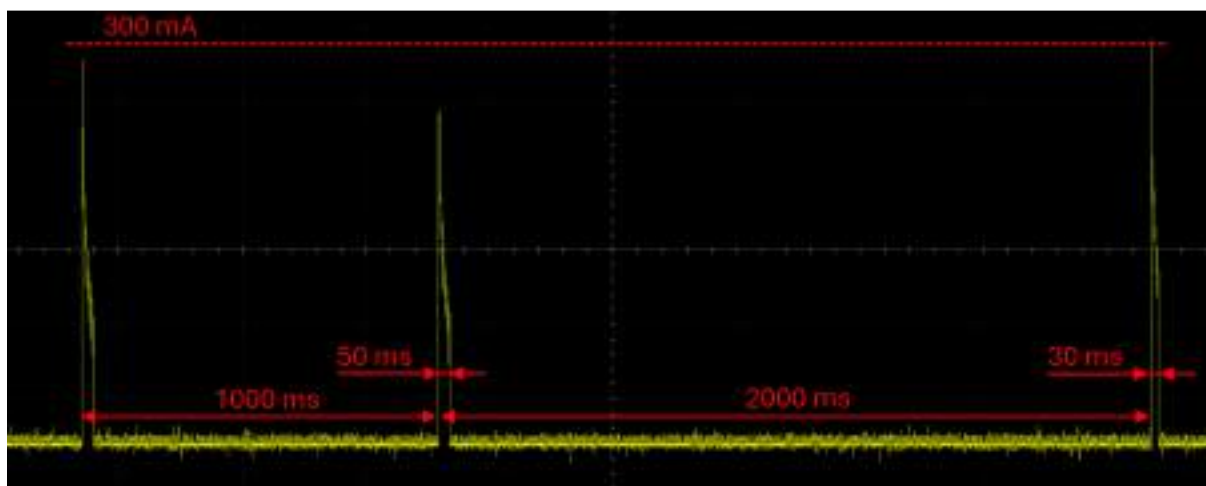


Rysunek 4.67. Zmiany przepływu przy skróconym teście

	Punkt przełączenia e	Czas włączenia T_czas	Okres pomiędzy włączeniami T_krok
Zakres 1	e0 = 0,01 l/min	15 ms	2 s
Zakres 2	e1 = 0,1 l/min	30 ms	2 s
Zakres 3	e2 = 0,4 l/min	50 ms	1 s
Zakres 4	e3 = 1 l/min	100 ms	1 s
Zakres 5	e4 = 2 l/min	200 ms	1 s

Tabela 4.7. Ustawienia dobrane podczas testu regulacji przepływu

przedstawione nastawy zapewniały szybką i dokładną regulację, ale w wielu przypadkach testowych korzystniej jest zmieniać regulowaną wartość w wolniejszy sposób. Wolniejsze zmiany dają kontrolowanemu procesowi czas na ustabilizowanie warunków temperaturowych, ciśnieniowych, a w skrajnym przypadku na przerwanie regulacji, gdy zostaną przekroczone progi alarmowe na jednym z kluczowych parametrów. Zmniejsza się również ryzyko przeregulowania. Z tego względu przyjęto nastawy zapewniające mniej dynamiczną regulację przedstawione w tabeli 4.7. Pomiar prądu części napędowej został wykonany poprzez pomiar spadku napięcia na rezystorze o niskiej wartości wpiętego szeregowo ze sterownikiem napędu. Zarejestrowane dane przeniesiono na komputer i obliczono średnią wartość prądu dla badanego przebiegu korzystając z prawa Ohma. W obliczeniach uwzględniono energię wykorzystaną w trakcie



Rysunek 4.68. Przebieg prądu silnika na skraju przełączenia zakresów prędkości regulacji

pulsów generowanych przy regulacji po zmianie wartości zadanej oraz podczas doregulowań. Szerokość i częstotliwość kroków zmieniała się podczas badań zgodnie z przyjętymi zakresami w sposób przedstawiony na rysunku 4.68. Pobór prądu na początku ruchu jest bliski prądowi znamionowemu silnika i wynosi do 300 mA. W związku z tym im dłuższy jest krok ruchu tym niższy jest średni pobór prądu w danym kroku. Znając napięcie zasilania można łatwo obliczyć zużycie energii przypadające każdej szerokości kroku, co zostało wykorzystane do obliczenia zużycia energii podczas pełnego testu trwającego godzinę. Uzyskane średnie zużycie energii dla regulacji przepływu zostało przedstawione w tabeli 4.8. Zużycie energii

Zasilanie części kontrolno-pomiarowej 3.6V 900mAh (nRF52840 + MAX11410)				Zasilanie części napędowej 3x9V 540 mAh (silnik + DRV8874)			
Średni prąd	Czas			Średni prąd	Czas		
[μ A]	[godzin]	[dni po 8 godz.]	[doby]	[μ A]	[godzin]	[dni po 8 godz.]	[doby]
121,4	7413,5	926,7	308,9	109,1	4949,15	618,6	206,2

Tabela 4.8. Zużycie energii i szacowany czas pracy podczas reg. przepływu z pomiarem pozycji

podczas regulacji przepływu może się jednak znacznie różnić pomiędzy poszczególnymi badaniami ponieważ liczba doregulowań jest zależna od stabilności testowanego procesu. W testowanym przypadku badania wykonywanego przez godzinę i składającego się z sześciu powyżej przedstawionych zmian, doregulowania podnosiły zużycie tylko o około 15 %, co było możliwe dzięki stabilnej temperaturze oleju. Został również zmierzony średni pobór prądu przez część kontrolno-pomiarową (w tab 4.8 przedstawiony z aktywnym pomiarem pozycji). W tym wypadku pomiary są bardziej uniwersalne ponieważ zużycie prądu nie zależy w zauważalny sposób od przebiegu wykonywanego badania ze względu na stałą częstotliwość komunikacji. Pobór prądu zmienia się natomiast wraz z typem obsługiwanego czujnika zapewniającego sprzężenie zwrotne lub wartość pomocniczą. Po wyłączeniu pomiaru pozycji podczas regulacji przepływu możliwe było zredukowanie poboru prądu części kontrolno-pomiarowej nawet o 40 % (w stosunku do przedstawionego w tabeli), ponieważ nie był wtedy używany przetwornik ADC.

4.3.8 Podsumowanie

Analiza potencjalnych obszarów wdrożenia inteligentnych rozwiązań IoT w laboratoriach testujących komponenty lotnicze doprowadziła do zaproponowania konstrukcji zasilanego bateryjnie, komunikującego się bezprzewodowo sterownika ustawnika pozycyjnego, o niskim zużyciu energii. Z przeglądu wiedzy wynika, że większość ustawników pozycyjnych stosowanych do zmiany ustawienia zaworów regulacyjnych nie oferuje dokładności regulacji niezbędnej w precyzyjnych testach lotniczych. Zatem podniesienie dokładności regulacji było również celem prac konstrukcyjnych. Na podstawie analizy sposobu pracy ustawników pozycyjnych i charakterystyki badań prowadzonych w laboratoriach zostało zaproponowane rozwiązanie polegające na wykonywaniu kroków będących kolejnymi ruchami napędu, pomiędzy którymi sterownik ustawnika jest przełączany w tryb uśpienia, w którym zużycie energii jest bardzo zredukowane. Wpływa to również korzystnie na dokładność pomiaru wielkości będącej źródłem sprzężenia zwrotnego, ponieważ daje to kontrolowanemu procesowi czas na ustabilizowanie się po zmianie warunków. Taki sposób sterowania pozwala napędowi oczekiwać przez miesiące na otrzymanie wartości zadanej, przy podtrzymanej komunikacji BLE. Zostały przeprowadzone badania odwzorowujące typową pracę zaworu podczas badań komponentów lotniczych. Sprawdzono pracę ustawnika przy regulacji pozycji oraz przepływu. Potwierdzono również obsługę czujnika ciśnienia i termoelektrycznego czujnika temperatury bezpośrednio poprzez sterownik ustawnika. Dla wszystkich testowanych przypadków zużycie energii było bardzo niskie. Przeprowadzono oszacowania wskazujące, że sterownik może pracować w ten sposób przez wiele miesięcy. Badania potwierdziły, wysoką dokładność regulacji i nieporównywalnie niższe zużycie energii w stosunku do rozwiązań dostępnych na rynku. Zaproponowane rozwiązanie może być z powodzeniem stosowane zarówno w testach krótkoterminowych jak i długoterminowych. Wprowadzenie bezprzewodowych ustawników pozycyjnych, o wysokiej precyzji regulacji znacznie upraszcza sposób przygotowywania testów w laboratoriach. Możliwość obsługi czujników podłączonych przewodowo i bezprzewodowo do ustawnika pozwala na budowę lokalnych układów regulacji, z czujnikami znajdującymi się w pobliżu ustawnika (np. czujnikami temperatury, czujnikami ciśnienia, przepływomierzami o wyjściu napięciowym). Zaproponowane rozwiązanie polegające na generowaniu kroków było testowane z silnikami prądu stałego, ale może zostać zastosowane również z innymi typami napędów. Obecnie na nowym stanowisku badawczym do testowania wymienników ciepła w Sieci Badawczej Łukasiewicz - Instytucie Lotnictwa wdrażane jest rozwiązanie kontroli przepływu bazujące na opracowanym sposobie sterowania i innym typie ustawnika. W połączeniu z nowym dokładniejszym przepływomierzem ma to umożliwić regulację w zakresie 0,008-4 l/min. Wdrożenie takiego rozwiązania jest konieczne ze względu na to, że na rynku brak rozwiązań spełniających takie wymagania testu. Tak dokładna kontrola przepływu w szerokim zakresie jest szczególnie istotna w badaniach wymienników ciepła, ponieważ na podstawie wyników badań są sprawdzane modele numeryczne.

4.4 Inteligentny układ detekcji wycieków na stanowiskach badawczych

W rozdziale zostanie przedstawiony przebieg procesu projektowania oraz badania inteligentnego bezprzewodowego układu detekcji wycieków, dedykowanego zastosowaniu na stanowiskach badania komponentów lotniczych.

4.4.1 Założenia projektowe

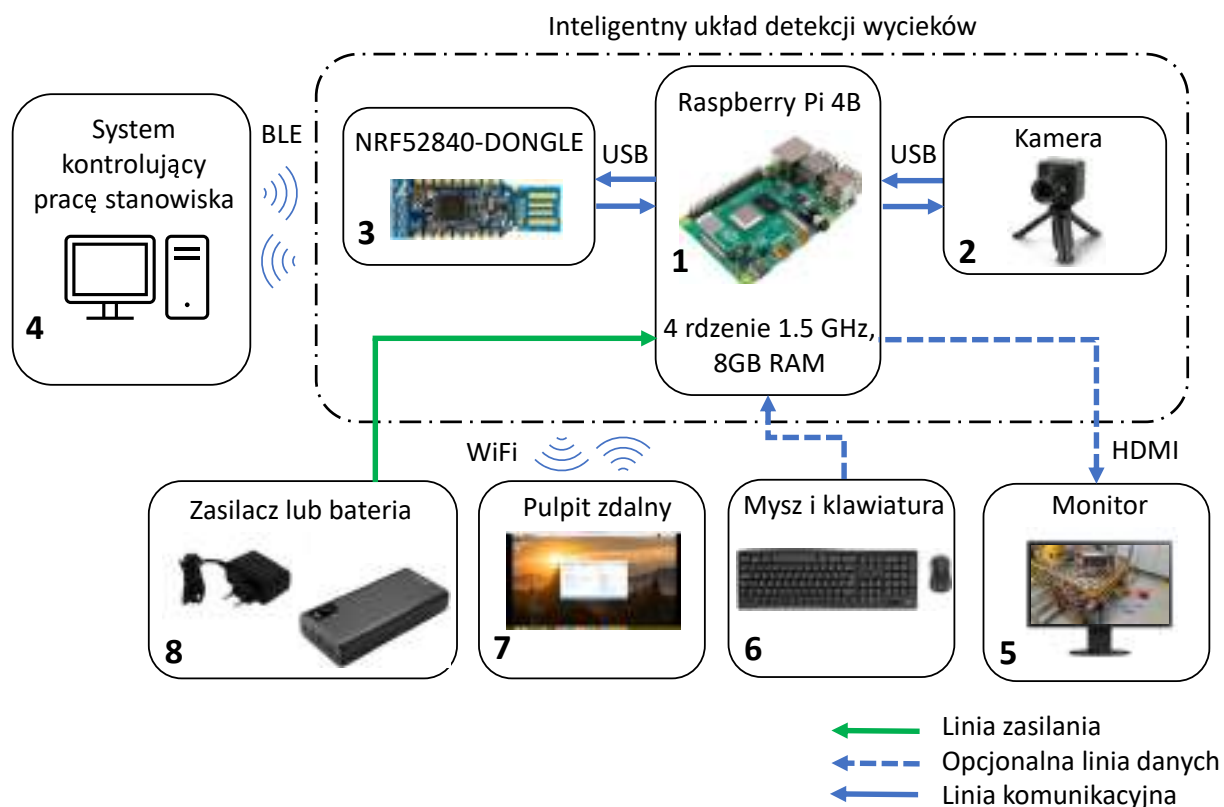
Wykorzystanie widzenia komputerowego w testach komponentów lotniczych może znacząco ułatwić pracę operatora testu i zredukować skutki potencjalnych awarii. Punktem wyjścia do rozpoczęcia prac były powszechne problemy w wykrywaniu wycieków na stanowiskach badawczych oraz inne problemy w diagnozowaniu nieprawidłowej pracy stanowiska. Na przestrzeni lat wycieki wielokrotnie miały wpływ na zafałszowanie wyników testów oraz straty finansowe związane z utratą oleju lub uszkodzeniem obiektu testowego. Wykonany przegląd wiedzy pozwolił na określenie poniższych założeń projektowych:

- wykorzystanie komputera Raspberry Pi oraz kamery;
- wykorzystanie języka Python i biblioteki OpenCV;
- wykrywanie wycieków na obrazie rejestrowanym w czasie rzeczywistym;
- wykrycie anomalii w rejestrowanym obrazie na podstawie porównania do zapisanego obrazu wzorcowego;
- sygnalizowanie wykrycia wycieków poprzez połączenie BLE;
- wykorzystanie tylko podstawowych technik przekształceń oraz analizy obrazu, bez użycia metod sztucznej inteligencji;
- zasilanie poprzez zasilacz 5V/3A i opcjonalne zasilanie bateryjne.

Zastosowanie komputera Raspberry Pi w połączeniu z językiem Python oraz biblioteką Open CV daje możliwość wykonywania różnego rodzaju przekształceń w nieskomplikowany sposób. Takie zestawienie oferuje również pole do szybkiego dopasowania programu do wymagań konkretnych aplikacji, które mogą być zróżnicowane pomiędzy laboratoriami. Początkowo było rozważane wykorzystanie uczenia maszynowego z użyciem sztucznych sieci neuronowych, wykorzystując bazę zdjęć wycieków jako materiał do trenowania sieci neuronowej. Jednak po głębszej analizie zrezygnowano z tego pomysłu, ponieważ już w zaproponowanym prostym podejściu udało się uzyskać bardzo dobre efekty, co zostanie dalej przedstawione. Wykorzystanie sztucznej inteligencji wymagałoby również większej wiedzy od osób dokonujących konfiguracji. Ponadto, przedstawione podejście jest również bardziej dopasowane do sposobu prowadzenia testów w laboratoriach, w których wykonuje się badania w zamkniętych pomieszczeniach i stałych warunkach oświetleniowych, co ułatwia analizę.

4.4.2 Struktura układu

Zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 4.69 komputer Raspberry Pi 4B (1), będący bazowym elementem systemu, został wyposażony w kamerę z czujnikiem obrazu Sony IMX477 o maksymalnej rozdzielczości 12,3 Mpix (2) [149]. Do zapewnienia komunikacji bezprzewodowej w standardzie BLE został wykorzystany moduł z układem nRF52840 (3), podłączony do portu USB. W ten sposób informacje o wystąpieniu wycieku mogą zostać przekazane do systemu kontrolno-pomiarowego (4) w laboratorium. Dodatkowo podczas

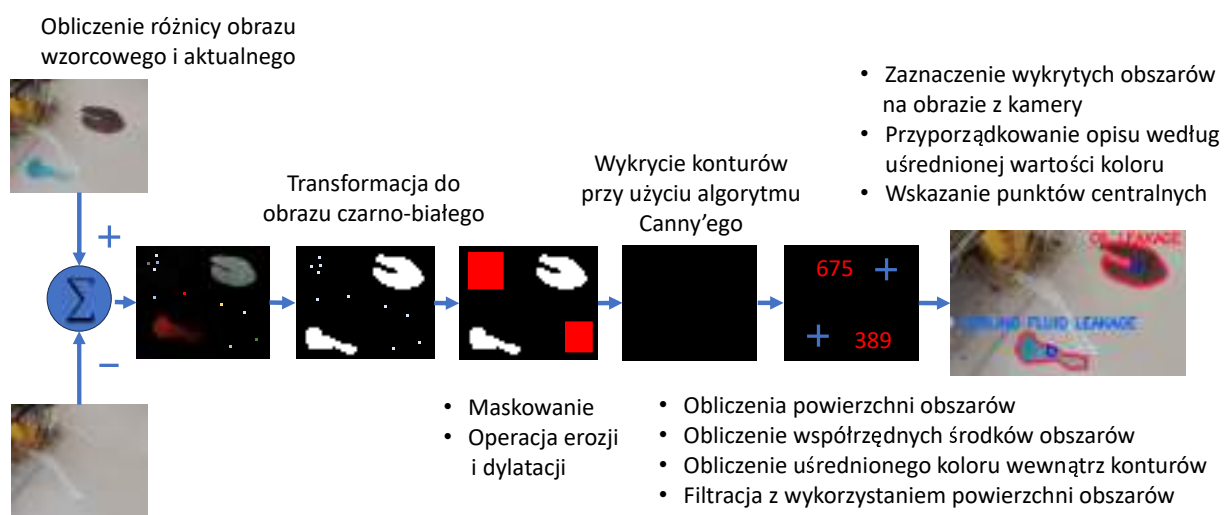


Rysunek 4.69. Raspberry Pi z kamerą wykorzystywaną w badaniach

testów do sygnalizacji wykrycia zmiany może zostać wykorzystane jedno z wejść/wyjść GPIO (ang. *General Purpose Input and Output*) komputera Raspberry Pi. Opcjonalnie obszary wykrycia mogą być wskazywane operatorowi na monitorze (5) podłączonym poprzez interfejs HDMI. Konfiguracja systemu może zostać zmieniona za pomocą klawiatury i myszki (6) podłączanej do komputera lub poprzez pulpit zdalny (7) realizowany z pomocą wbudowanego modułu WiFi. Po skonfigurowaniu nie są one jednak niezbędne do działania systemu. Ze względu na wysokie zużycie energii w porównaniu do wcześniej testowanych przetworników inteligentnych zostało wykorzystane zasilanie poprzez zasilacz lub baterię o dużej pojemności (8). Powyżej przedstawione zestawienie umożliwia szybkie i proste wdrożenie systemu na stanowiskach badawczych. Niski koszt elementów pozwala wprowadzić kilka niezależnych punktów obserwacji, co może mieć znaczenie w efektywności monitorowania miejsc trudno dostępnych.

4.4.3 Wykrywanie wycieków na podstawie detekcji konturu zmiany

Testy komponentów lotniczych odbywają się zazwyczaj w zamkniętych pomieszczeniach przy stałych warunkach oświetleniowych, co znacznie ułatwia wykrywanie różnego rodzaju zmian np. wycieków. W takich warunkach z powodzeniem mogą być wykorzystywane proste przekształcenia obrazu, w celu wyodrębnienia obszaru zmiany. Pierwszy z zaproponowanych algorytmów polega na wyodrębnieniu obrazu odpowiadającego wyciekowi oleju lub chłodziwa, poprzez porównanie z zapisanym wzorcowym obrazem stanowiska w stanie sprzed wystąpienia awarii. Zdjęcie wzorcowe jest wykonywane po otrzymaniu sygnału startu testu z głównego systemu sterującego stanowiskiem i może zostać ponownie nadpisane w trakcie działania programu np. na początku każdego cyklu testowego. Ponowne nadpisywanie ograniczy wpływ stopniowego zabrudzenia stanowiska i innych postępujących zmian obrazu na skuteczność wykrywania wycieków. Porównywanie zdjęć wykonywanych w dużym odstępie czasowym mogłoby powodować fałszywe stany alarmowe. Głównym etapem algorytmu wykrywania zmian jest odjęcie od siebie pikseli zdjęcia wzorcowego od pikseli zdjęcia aktualnego, co pozwala w prosty sposób wyszczególnić różnice (rys. 4.70). Następnie obraz jest transformowany do obrazu



Rysunek 4.70. Przebieg operacji graficznych

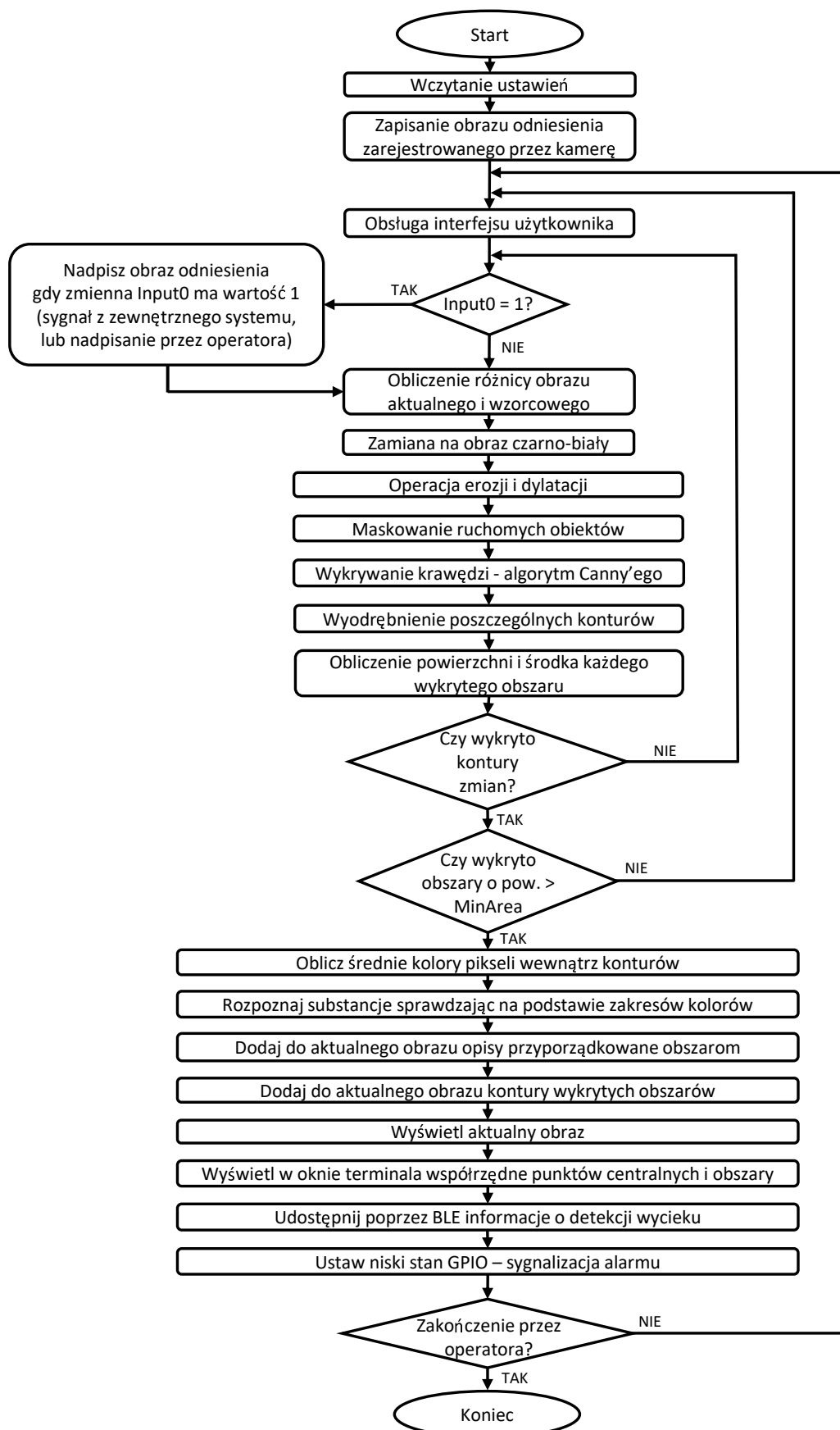
czarno-białego, w ramach przygotowania do operacji wykrywania krawędzi według algorytmu Cann'ego opisanego w rozdziale 3.7.2. Podczas obliczania różnicy oprócz zmiany wynikającej z wystąpienia wycieku, zostają wyszczególnione efekty drgań kamery, stanowiska i innych zakłóceń. W celu wyeliminowania ich wpływu na dalsze przetwarzanie uzyskanego obrazu zostaje przeprowadzona operacja erozji, usuwająca zmiany o małej powierzchni. Efektem ubocznym tej operacji jest zmniejszenie powierzchni obszaru reprezentującego wyciek, czemu przeciwdziała operacja dylatacji zwiększająca poszukiwany obszar do wartości bliższej rzeczywistości. Kolejnym krokiem jest wyłączenie z przetwarzania obrazu ruchomych elementów przez wykorzystanie maskowania obszarów, w których one pracują. Po podłączeniu monitora i klawiatury lub uruchomieniu połączenia zdalnego operator ma możliwość zaznaczenia w pro-

gramie graficznym obszarów na obrazie przedstawiającym poprawną pracę stanowiska, które nie biorą udziału w detekcji konturów, poprzez nadanie im ustalonego koloru (rys.4.71). Zatem, przed przystąpieniem do detekcji konturów zmian obraz jest przetwarzany i filtrowany na kilka sposobów, w celu ograniczenia nieprawidłowych wykryć. Po zakończeniu przygotowania obrazu



Rysunek 4.71. Maskowanie ruchomych elementów na stanowisku testowym

zostaje przeprowadzona operacja wykrywania krawędzi z wykorzystaniem algorytmu Cann'ego, a następnie operacja wykrywania poszczególnych konturów pozwalająca na obliczenie powierzchni liczonych w pikselach obrazu oraz współrzędnych centralnych punktów wykrytych obszarów. W celu odfiltrowania małych zmian nie mających wpływu na bezpieczeństwo prowadzenia testu zostają odrzucone obszary o powierzchni mniejszej niż wartość ustalona przez operatora. Następnie, w celu określenia jaka substancja została wykryta zostaje obliczona średnia wartość koloru wewnątrz wykrytego konturu (średnia dla każdej składowej przestrzeni barw RGB). Kolor bliższy kolorowi brązowemu odpowiada wykryciu oleju, a kolor jasnoniebieski oznacza detekcję wycieku chłodziwa. Opisany układ pomiarowy był przygotowywany głównie z myślą o testach długoterminowych składających się z dziesiątek tysięcy cykli testowych, ale może mieć również zastosowanie w krótszych testach, wykonywanych w trybie sterowania ręcznego, skracając czas reakcji operatora na wystąpienie awarii. W takich testach występuje większe prawdopodobieństwo wejścia operatora w obszar rejestrowany przez kamerę np. w celu doregulowania ustawień stanowiska, co może niepotrzebnie wyzwolić algorytm. Z tego względu dodano opcję wstrzymywania monitorowania zmian obrazu przez wysłanie komendy. Operator ma możliwość wstrzymania programu przed wejściem do pomieszczenia testowego i ponownego uruchomienia algorytmu, bez konieczności zamykania programu. W przypadku testów wykonywanych w trybie manualnym nie ma możliwości uzależnienia aktualizacji obrazu wzorcowego od sygnału informującego o rozpoczęciu cyklu. Z tego względu wprowadzono funkcję aktualizacji obrazu wzorca na żądanie, poprzez interfejs programu. Polecenie startu i stopu monitorowania oraz uaktualnienia obrazu wzorcowego jest obsługiwane poprzez połączenie BLE. Jak wspomniano wcześniej system ma możliwość sygnalizacji wystąpienia wycieku bezprzewodowo poprzez BLE lub wejścia/wyjścia GPIO. Algorytm działania systemu przedstawiono na rysunku 4.72.



Rysunek 4.72. Algorytm detekcji wycieków na podstawie wykrywania konturów zmian

W celu potwierdzenia skuteczności wykrywania wycieków zostały wykonane różnego rodzaju testy symulujące wycieki na stanowisku testowym, które wykazały wysoką skuteczność zaproponowanego rozwiązania. W jednym z pierwszych testów wyciek oleju był symulowany przez rozlanie oleju i chłodziwa obok stanowiska, poprzez przygotowane do tego celu rurki przyklejone do podłogi (rys. 4.73). Jako wzorzec posłużył obraz sprzed wygenerowania wycieku. Wykrycie nastąpiło dopiero po przekroczeniu powierzchni określonej w liczbie pikseli obrazu, zgodnie z wcześniej przedstawionym algorytmem. Nazwy substancji zostały przyporządkowane zgodnie z ustalonym w programie zakresem kolorów. Podczas testowania algorytmu opisanego w kolejnym paragrafie wystąpił przypadkowy wyciek wynikający z niedokręcenia złącza, który również został wykryty (rys. 4.74), co dodatkowo potwierdza działanie algorytmu bazującego na wykrywaniu konturów zmian. Stałe warunki oświetleniowe i ograniczony dostęp obsługi laboratorium podczas prowadzenia testów stwarza doskonałe warunki do zastosowania tego rodzaju metodologii. Nie są wykrywane tylko te wycieki, które z różnych przyczyn nie są wystarczająco widoczne na obrazie z kamery. Takie sytuacje są jednak rzadkością i występują zazwyczaj tylko w początkowym etapie wycieku. Opracowana metoda została zastosowana do wykrywania wycieków podczas prowadzonego testu łożyskowego. Stanowisko ma pracować przez ponad dwa lata ze stałą prędkością obrotową, z przerwami wyłącznie na czynności serwisowe. Uszkodzenie łożyska w wyniku wycieku oleju smarującego spowodowane wyciekiem mogłoby spowodować utratę efektu badań, którym jest postępujące zużycie.



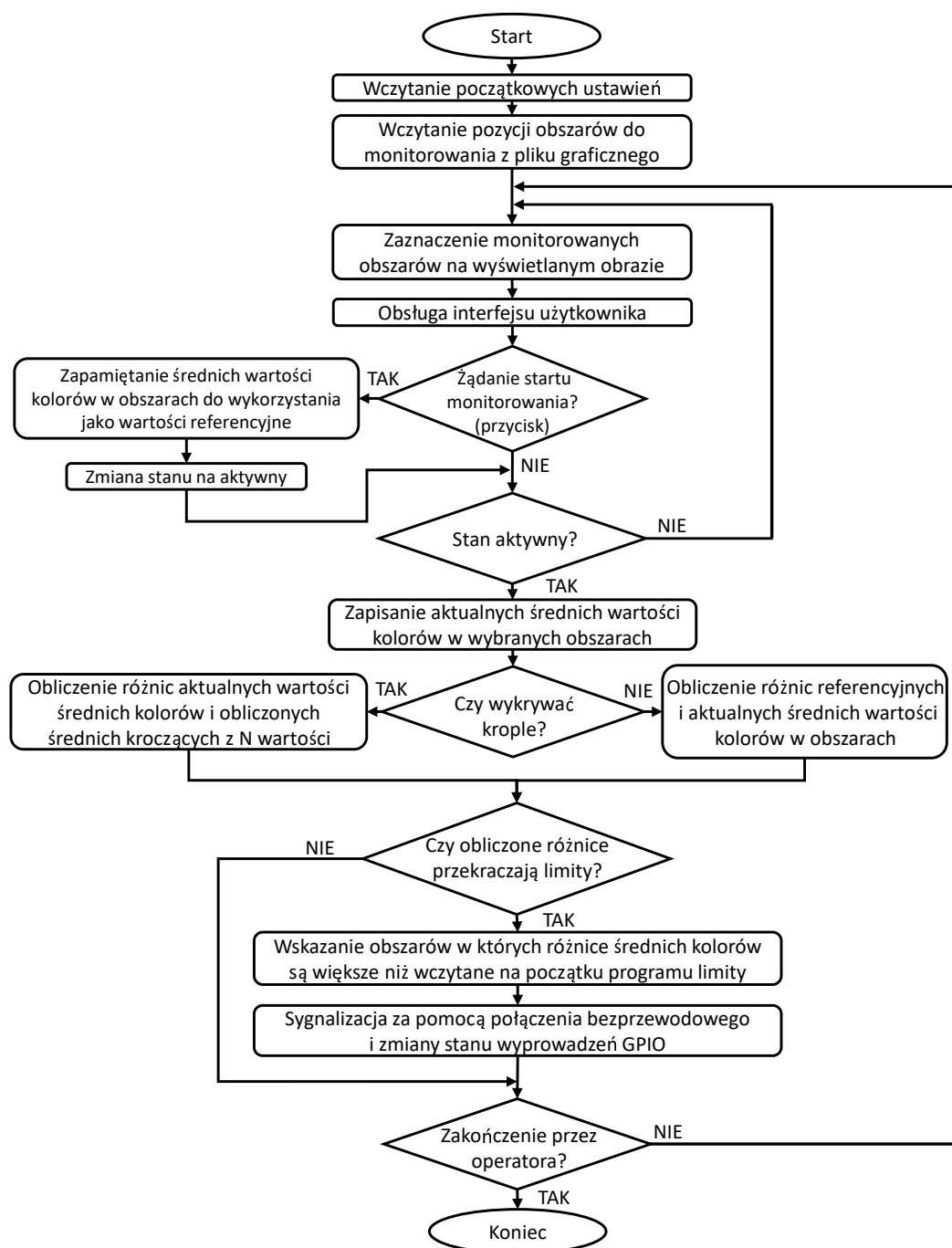
Rysunek 4.73. Symulacja wycieku oleju i glikolu



Rysunek 4.74. Przypadkowy wyciek oleju pod zbiornikiem podczas prowadzenia testów

4.4.4 Monitorowanie wybranych obszarów

Doświadczenie zdobyte podczas badań opisanych w poprzednim paragrafie były podstawą do zaproponowania dodatkowej funkcji polegającej na wykrywaniu zmiany w wybranych obszarach. Poprzedni algorytm sprawdził się z wysoką skutecznością w detekcji wycieków, ale nie pozwalał na monitorowanie alarmowych poziomów oleju i detekcji kropeł, co jest istotne podczas prowadzenia testów. Operator ma możliwość zdefiniowania obszarów (zaznaczając w pliku graficznym), w których zmiana jest wykrywana na podstawie średniej wartości koloru pikseli składających się na dany obszar (rys. 4.75). Pozwala to wyznaczyć wartość reprezentu-



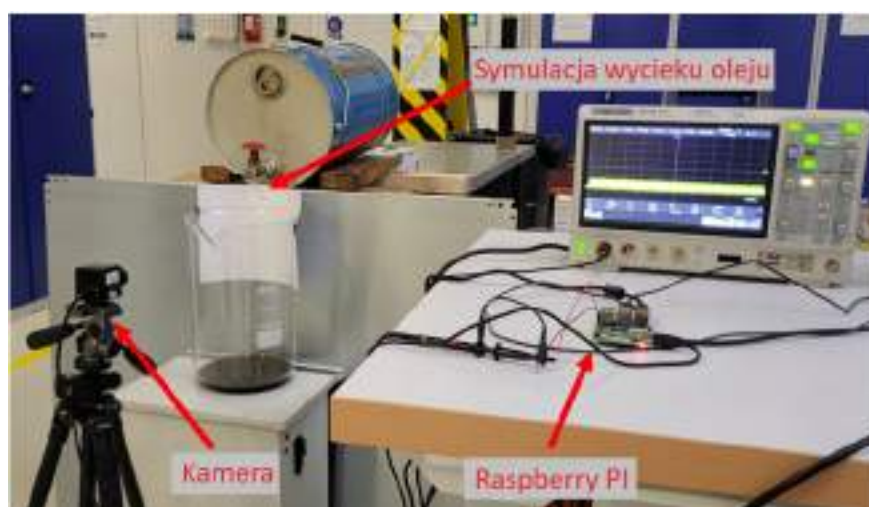
Rysunek 4.75. Monitorowanie wybranych obszarów

jącą zmianę w danym obszarze. Dla każdego piksela jest wyliczana średnia z trzech składowych RGB, a następnie jest liczona średnia ze wszystkich tak obliczonych wartości dla pikseli w rozpatrywanym obszarze. Gdy program, jest wykorzystywany do detekcji kropeł wartość progu wyzwolenia jest liczona na podstawie średniej wartości ustalonej liczby poprzednich pomiarów, w celu wyeliminowania liczby fałszywych detekcji. Podobnie jak w przypadku poprzedniej funkcji tutaj również zostały wykonane badania na stanowisku (rys. 4.76). W jednym, z badań zostały ustalone dwa punkty alarmowe oleju obserwowanego przez wąż pełniący rolę wskaźnika poziomu oleju. Gdy olej znajdował się pomiędzy poziomami alarmowymi została włączona funkcja monitorująca. Test wykazał działanie funkcji zgodne z oczekiwaniami, było możliwe wykrycie poziomów alarmowych.



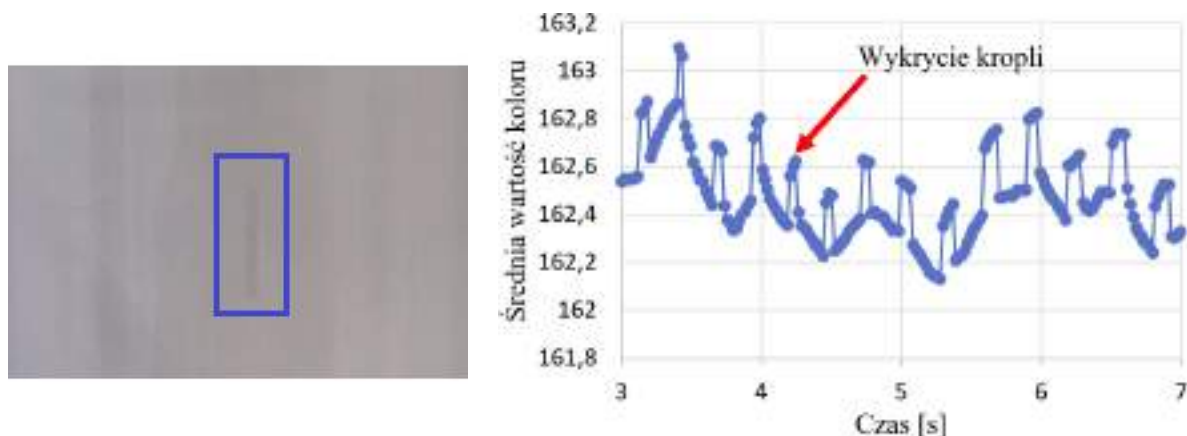
Rysunek 4.76. Wykrycie przekroczenia ustalonego poziomu oleju (czerwony kwadrat)

Przedstawiony program został również wykorzystany do detekcji spadających kropeł oleju. Zliczanie kropeł jest dobrze znaną metodą szacowania wielkości wycieku, stosowaną w testach lotniczych. W celu dostrojenia ustawień i potwierdzenia detekcji kropeł zostało przygotowane proste stanowisko testowe (rys. 4.77) wyposażone w zbiornik oleju z zaworem, który



Rysunek 4.77. Stanowisko przygotowane na potrzeby testu detekcji kropeł

po rozszczelnieniu pozwala na regulację częstotliwości opadania kroplel, kamerę podłączoną do komputera Raspberry Pi z modułem rozszerzeń oraz oscyloskop. Podczas testów krople były obserwowane poprzez ściankę szklanego zbiornika, do którego wpadały (rys. 4.78a), tak jak ma to miejsce podczas rzeczywistych testów w laboratorium. Układ zliczał krople w czasie i udostępniał taką wartość poprzez połączenie BLE. Po przekroczeniu progu wyzwolenia na wyjściu cyfrowym komputera Raspberry Pi podłączonym do oscyloskopu był ustawiany sygnał wysoki. Wartość średnia koloru w obszarze była zapisywana do pliku tekstowego na karcie pamięci komputera Raspberry Pi (rys. 4.78b). Pomimo słabej widoczności

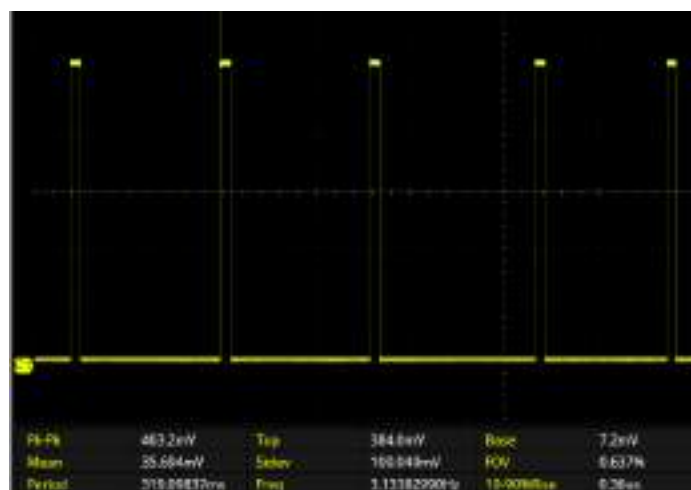


(a) Kropla na obrazie z kamery

(b) Zmiana średniego koloru w obszarze - zapis do pliku

Rysunek 4.78. Rejestracja spadających kroplel oleju podczas wstępnych testów

przelatującej kropli oleju, na obrazie rejestrowanym przez kamerę udało się wykrywać każdą z opadających kroplel. Warunki oświetleniowe nie były w pełni stałe również przez częściowe zmienne zasłanianie światła przez operatora, jednak dzięki progowi wyzwolenia zmieniającemu się wraz ze średnią wartością kilku ostatnich pomiarów algorytm działał prawidłowo (rys. 4.79). Zostały również wykonane udane testy z dwoma podłączonymi kamerami, co znacznie zwiększa potencjalne możliwości systemu. Widoczność kroplel na rejestrowanym obrazie mogłaby



Rysunek 4.79. Obraz detekcji kroplel na oscyloskopie przy częstotliwości około 3 Hz (wyjście GPIO)

zostać podwyższona przez zastosowanie szybszej kamery wyższej klasy, jednak to znacznie podniosłoby koszty rozwiązania. Zaproponowany algorytm został wykorzystany niezależnie od sieci czujników do pomiaru wycieku w jednym z testów w Sieci Badawczej Łukasiewicz - Instytucie Lotnictwa. Głównym celem przeprowadzonych badań była redukcja wycieków w silniku lotniczym, a zliczanie kropeł pełniło funkcję głównego pomiaru, na podstawie którego zmieniane były pozostałe parametry. Trudne warunki pracy, takie jak wysoka temperatura i niskie ciśnienie nie pozwoliły przeprowadzić pomiaru z wykorzystaniem precyzyjnej wagi, co było wstępnie rozpatrywane. Test wymagał wysokiej precyzji pomiaru przepływu oleju pomimo trudnych warunków środowiskowych. Zaproponowany system zliczał krople wpadające do szklanych naczyń znajdujących się pod zbiornikiem (rys. 4.80), w którym ciśnienie



Rysunek 4.80. Zbiorniki w końcowej części instalacji służącej do pomiaru wycieku oleju

było obniżone poniżej ciśnienia atmosferycznego. Przez zbiornik przepływało powietrze o temperaturze do 300°C, z wysokim wydatkiem przepływu. Sygnał detekcji był przesyłany do głównego systemu akwizycji i dzięki temu mógł być analizowany w prosty sposób, razem z innymi pomiarami zarejestrowanymi podczas testu. W celu monitorowania wycieku na bieżąco, do komputera Raspbery Pi był podłączony monitor, który oprócz obrazu z kamery wyświetlał wynik pomiaru w jednostce czasu. Wyjście GPIO było podłączone do systemu pomiarowego laboratorium, dzięki czemu pomiary mogły być rejestrowane w jednej podstawie czasu z innymi sygnałami. Zastosowanie systemu znacznie usprawniło przeprowadzenie testu.

4.4.5 Podsumowanie

Zostały zaproponowane dwa algorytmy związane z monitorowaniem wycieków na stanowiskach badania komponentów lotniczych. Pierwszy z nich pozwala na detekcję wycieków na podstawie wykrywania konturów zmian, które odpowiadają wyciekom na zarejestrowanym obrazie. Drugi algorytm pozwala na monitorowanie zmian w wybranych obszarach na podstawie zmiany średniej wartości koloru pikseli składających się na dany obszar. Może on zostać wykorzystany do wykrywania alarmowych poziomów płynów lub szacowania skali wycieków na podstawie zliczania kropeł. Przedstawione algorytmy mają znaczenie szczególnie podczas testów długoterminowych wykonywanych bez nadzoru operatora, ale w niektórych wypadkach mogą być przydatne również podczas testów krótkoterminowych, skracając czas reakcji operatora na zaistniałą awarię. Trudno określić dokładnie skuteczność zaproponowanych algorytmów, ale z pewnością jest ona wysoka. We wszystkich testowanych przypadkach udało się wykryć wycieki lub zmiany w wybranych obszarach. Działanie przygotowanego układu pomiarowego zostało potwierdzone w szeregu badań i ostatecznie wykorzystane do monitorowania testów prowadzonych w laboratorium. Kontrola układu pomiarowego może odbywać się poprzez myszkę, klawiaturę i monitor, które mogą zostać podłączone do systemu na czas konfiguracji. Drugą metodą konfiguracji jest skorzystanie z pulpitu zdalnego. Po skonfigurowaniu układ może być obsługiwany przez połączenie BLE, w zakresie wstrzymywania monitorowania i aktualizacji obrazu wzorcowego. Tą drogą może być również zgłaszana detekcja wycieku i przekroczenie progów detekcji w wybranych obszarach. Przygotowany układ pomiarowy może zostać zasilony poprzez zasilacz lub baterię. Nacisk na obniżenie zużycia energii nie był tak duży jak w przypadku pozostałych trzech prezentowanych projektów. Przy zastosowaniu baterii o pojemności rzędu kilku tysięcy mAh, byłaby możliwa praca nie dłuższa niż kilka godzin. Z tego względu układ pomiarowy będzie zasilany głównie poprzez zasilacz. Powyżej przedstawiona metodologia pozwala w znacznym stopniu zwiększyć skuteczność monitorowania testów komponentów lotniczych, pomimo zastosowania tylko nieskomplikowanych przekształceń obrazu i metod wykrywania krawędzi. Pokazuje to potencjał jaki oferuje szersze wprowadzenie inteligentnych układów pomiarowych wykorzystujących metody widzenia komputerowego. Jeśli wykrywanie będzie miało być w przyszłości przeprowadzone w otoczeniu o wyższej zmienności niż pomieszczenie testowe, to działanie systemu może zostać rozszerzone o bardziej skomplikowane metody klasyfikacji np. z wykorzystaniem sieci neuronowych.

4.5 Przykładowy sposób wdrożenia systemu

W rozdziale przedstawiono przykładowy sposób wdrożenia przygotowanych rozwiązań opisanych w rozdziałach 4.1-4.4

4.5.1 Założenia projektowe

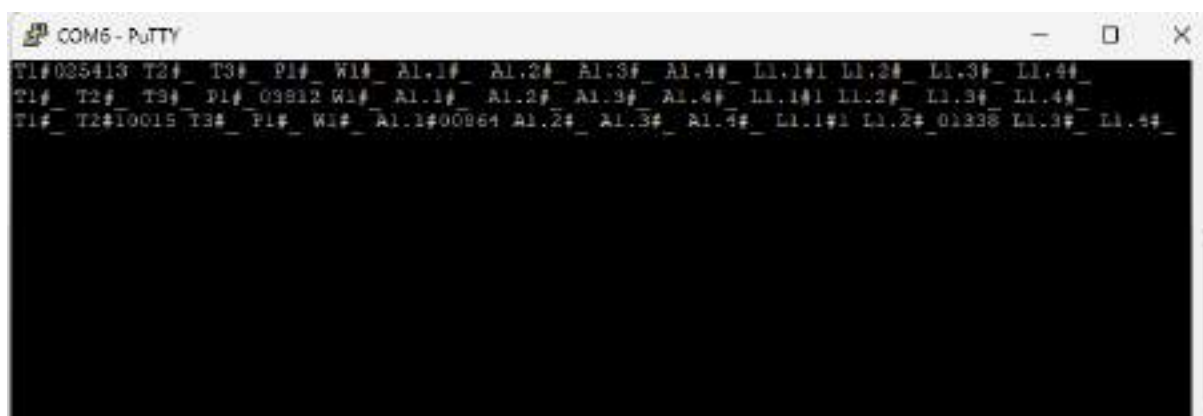
Na podstawie analizy charakterystyki systemów kontrolno-pomiarowych stosowanych w laboratoriach lotniczych oraz wymagań zaproponowanych przetworników i układów pomiarowych zostały ustalone następujące założenia projektowe:

- kompatybilność z rozwiązaniami zaprojektowanymi w punktach 4.1-4.4;
 - wyświetlanie danych pomiarowych z szesnastu przetworników;
 - wysyłanie zadanej wartości położenia pozycji do ustawnika;
 - sygnalizowanie wycieku i sterowania pracą układu detekcji wycieku;
- obsługa przetworników pracujących z częstotliwościami z zakresu 0,1-2 Hz;
- wykorzystanie środowiska LabVIEW zainstalowanego na komputerze;
- rolę punktów centralnych sieci pełnią moduły BLE wpięte do komputera;
- szeregową komunikację pomiędzy komputerem, a modułami BLE;
- możliwość zapisywania oraz wyświetlania danych w formie numerycznej i wykresów.

Zostało wybrane środowisko programistyczne LabVIEW firmy National Instruments, ponieważ jest ono powszechnie wykorzystywane w systemach kontrolno-pomiarowych w laboratoriach lotniczych. Wybór ma również aspekt wdrożeniowy ponieważ jest ono najczęstszym wyborem w projektowaniu wszystkich nowych stanowisk w Sieci Badawczej Łukasiewicz - Instytucie Lotnictwa. LabVIEW będące graficznym środowiskiem programistycznym pozwala na tworzenie zarówno prostych interfejsów urządzeń jak i skomplikowanych algorytmów kontrolno-pomiarowych. Kontrolery National Instruments, a zatem i karty wejść/wyjść są oferowane w standardach cRio i PXI. Pierwszy do mniej rozbudowanych systemów, a drugi do dużych systemów pomiarowych, często obsługujących setki kanałów pomiarowych. W najprostszych przypadkach LabVIEW może być również zainstalowane bezpośrednio na komputerze i obsługiwać dostępne interfejsy. W każdym z przypadków możliwa jest komunikacja szeregową, a zatem i obsługa przygotowanego systemu. W celu zademonstrowania pracy systemu został przygotowany prosty program w LabVIEW pozwalający na wyświetlanie danych pomiarowych przetworników, zadawanie wartości położenia ustawnikowi pozycyjnemu oraz zgłaszanie informacji o detekcji wycieku. Program został zainstalowany na komputerze, ale może on być również zaadaptowany do pracy na sterownikach cRIO i PXI. Niezbędne było również przygotowanie programu modułu BLE podłączonego poprzez USB. Wykorzystując zademonstrowaną metodologię można w łatwy sposób wprowadzić obsługę zaprojektowanych przetworników również w większym systemie kontrolno-pomiarowym.

4.5.2 Komunikacja przetworników z komputerem

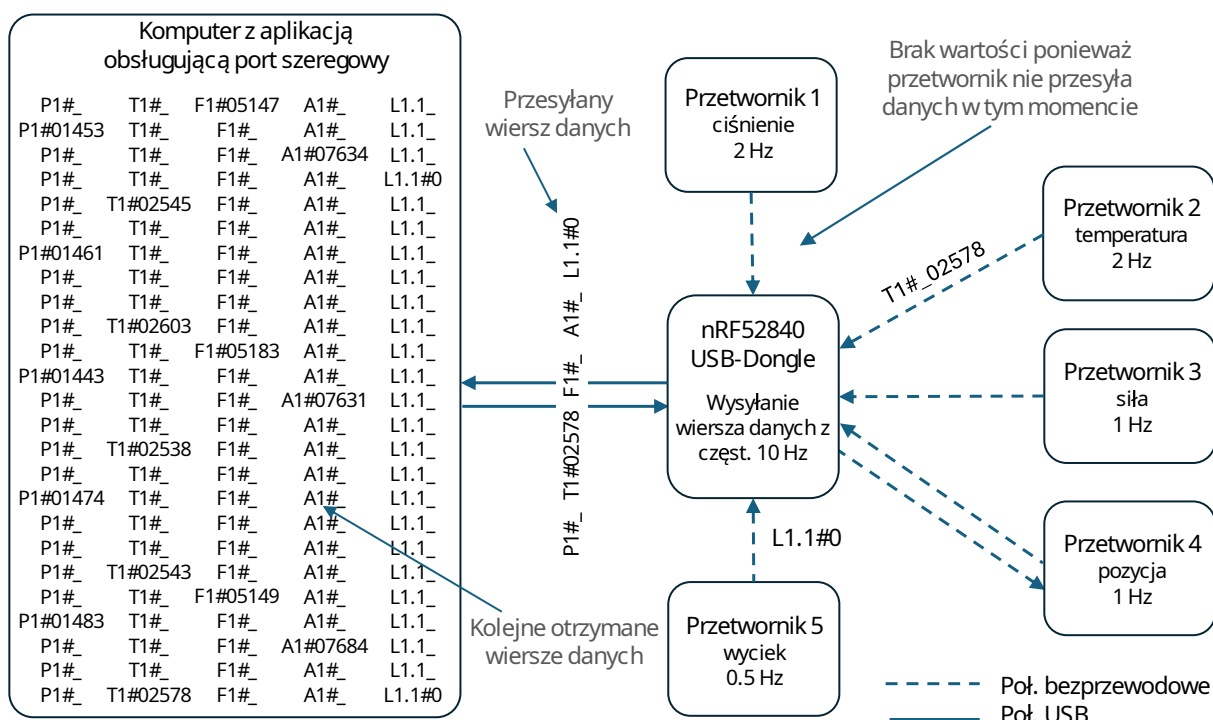
Do komunikacji z zaprojektowanymi urządzeniami w przeprowadzonych testach wykorzystano moduł USB nRF52840-Dongle, podłączony do wejścia USB komputera. Jest on rozpoznawany jako dodatkowy port komunikacji szeregowej i może być obsługiwany przez popularne aplikacje terminalowe takie jak Putty lub Tera Term. Z ich poziomu jest możliwa obsługa zaprojektowanych przetworników. Przyjęto założenie, że obrotowy przetwornik wielokanałowy jest obsługiwany przez oddzielny moduł BLE, a pozostałe przetworniki jednokanałowe przez wspólne moduły. Urządzenia pomiarowe zostały sparowane w ustawieniach programów układów z odpowiednim modułem pełniącym rolę węzła centralnego, tak żeby nawiązać automatycznie połączenie bezpośrednio po włączeniu zasilania. Moduł centralny odbiera dane pomiarowe z przetworników i na tej podstawie przygotowuje dane przesyłane do komputera. Dane przesyłane z modułów nRF52840-Dongle do komputera mają strukturę linii tekstu, w której kolejne dane są oddzielone spacją (rys. 4.81). Liczba przesyłanych wartości jest zależna



Rysunek 4.81. Kolejne wiersze danych odczytane w programie terminalowym

od liczby podłączonych bezprzewodowo przetworników. Każdy z przetworników przesyła do modułu centralnego wartości liczbowe, uzupełnione o literę określającą typ przetwornika i numer odpowiadający kolejności przetwornika w danej grupie. Przykładowo T oznacza przetwornik temperatury, P przetwornik ciśnienia. Opis kanału jest oddzielony od przesyłanej wartości liczbowej znakiem #. Wartości są przesyłane przy założeniu dokładności dwóch miejsc po przecinku i w ten sposób mogą być dekodowane z ciągu cyfr. Przygotowany system pozwala na współpracę z urządzeniami komunikującymi się z różnymi częstotliwościami z zakresu 0,1-2Hz. Z tego względu nie w każdym przesyłanym wierszu danych będą znajdowały się wartości liczbowe przypisane do każdego z przetworników. W przesyłanym do komputera łańcuchu znakowym będą umieszczane tylko nowe wartości otrzymane poprzez BLE. Komunikacja szeregową odbywa się z częstotliwością 10Hz, co zapewnia tylko minimalne opóźnienia w stosunku do momentu otrzymania danych pomiarowych poprzez BLE. Przedstawiony sposób komunikacji jest jednocześnie przyzwoleniem na występowanie opóźnień na poziomie 0,1 sekundy, pomiędzy momentem otrzymania danych przez moduł BLE,

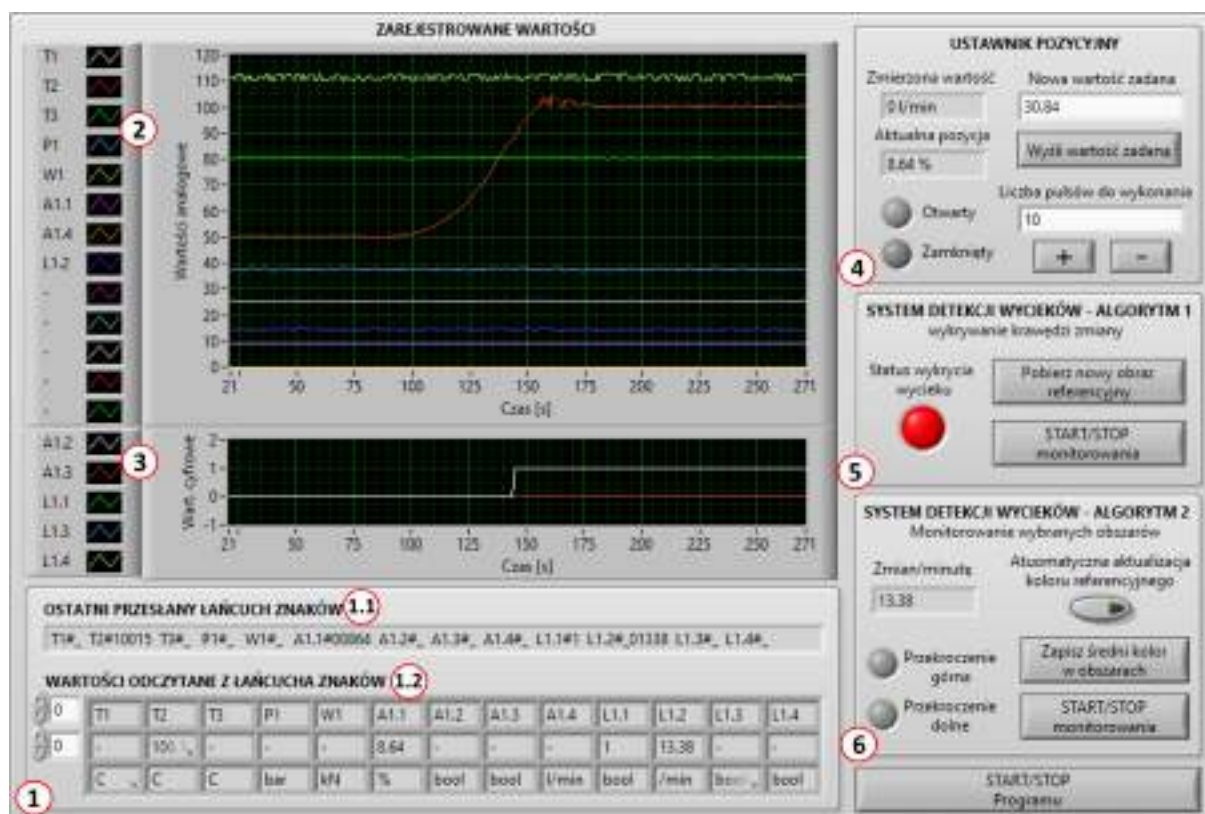
a wyświetleniem wyniku na komputerze. Dla rozważanych przypadków testowych nie ma to jednak dużego znaczenia. Pomiary nie są synchronizowane pomiędzy przetwornikami. Moment wykonania pomiaru poszczególnych przetworników jest ustalany względem wystąpienia zdarzenia polegającego na przesyłaniu danych pomiędzy punktem centralnym (modułem BLE), a przetwornikiem. Dopuszczalny odstęp czasowy pomiędzy kolejnymi zdarzeniami komunikacji urządzenia Peripheral i Central jest ustalony w ustawieniach urządzeń. Pomiar w każdym z przetworników jest wykonywany na chwilę przed uruchomieniem komunikacji. Wykorzystanie zdarzenia komunikacji BLE jako zdarzenia uruchamiającego procedurę pomiarową wprowadza zatem zmienność okresu czasu pomiędzy kolejnymi pomiarami na poziomie kilkudziesięciu milisekund. Takie odchylenia zostały jednak uznane za akceptowalne. Drogę danych od momentu wykonania pomiaru przez przetwornik do wyświetlenia w aplikacji kontrolno-pomiarowej lub terminalu tekstowym została przedstawiona na schemacie 4.82. Program punktu centralnego sieci pozwala również na przesyłanie nastawy położenia do ustawnika pozycyjnego. Nastawa musi zostać poprzedzona literą i cyfrą określającymi, do którego przetwornika mają być wysłane dane. Zgodnie założeniami projektu badania komunikacji zostały przeprowadzone również w sieci gwiazdowej szesnastu przetworników. Wykorzystano do tego celu szesnaście modułów BLE z układami nRF52840 symulujących pracę przetworników, co pozwoliło na przetestowanie wielu przypadków testowych. W każdej z testowanych konfiguracji komunikacja była możliwa. Jak wspomniano już wcześniej limitem deklarowanym przez producenta dla zastosowanego oprogramowania układowego S140 jest 20 podłączonych urządzeń.



Rysunek 4.82. Sposób przesyłania danych pomiędzy komputerem a przetwornikami

4.5.3 Przygotowany program kontrolno-pomiarowy

W celu zademonstrowania możliwego sposobu wdrożenia przetworników przedstawionych w poprzednich rozdziałach został przygotowany program w LabVIEW zastępujący aplikację terminalową. Interfejs programu (rys. 4.83) podzielono na pięć stref według obszarów obsługiwanych funkcji. Pierwszy obszar (1) obejmuje odczyt i dekodowanie ostatniego otrzymanego łańcucha znaków wyświetlanego w polu tekstowym (1.1). Tak jak opisano wcześniej wartości pomiarowe są poprzedzone literą określającą typ czujnika, liczbą określającą jego numer oraz znakiem # pełniącym rolę separatora. Kolejne ciągi znaków odpowiadające poszczególnym kanałom są ponadto rozdzielone znakiem spacji. Na tej podstawie program przypisuje odczytane wartości do poszczególnych kanałów pomiarowych i nadaje im nazwy oraz jednostki (1.2). Niektóre przetworniki przesyłają kilka wartości pomiarowych oprócz głównego pomiaru np. dotyczących położenia krańcowych lub przekroczenia ustalonych limitów. Ze względu na różną częstotliwość pomiarową przetworników w każdym przesyłanym łańcuchu znakowym znajdują się również puste pola. Odczytane wartości są wyświetlane na bieżąco w oknie wykresów pomiarów wielkości analogowych (2) i cyfrowych (3) aktualizowanych z częstotliwością 10 Hz, odpowiadającej głównej pętli programu. Opisy w legendzie wykresów odpowiadają odczytanym nazwom kanałów. Wartości na osi reprezentującej czas są przypisywane według czasu odczytanego z zegara systemowego w momencie otrzymania wartości pomiaru. W czwartym wyszczególnionym obszarze (4) zostały zebrane pola dotyczące ustaw-



Rysunek 4.83. Interfejs przygotowanego programu pomiarowego

nika pozycyjnego. W tym miejscu jest wyświetlana informacja o aktualnym stopniu otwarcia zaworu oraz o tym czy zostały osiągnięte położenia krańcowe. Gdy sterownik ustawnika obsługuje dodatkowy zewnętrzny czujnik zostaje również wyświetlona zmierzona wartość. Użytkownik ma możliwość wysyłania wartości zadanej do ustawnika pozycyjnego poprzez wpisanie wartości w pole numeryczne i zatwierdzenie przyciskiem. Może również wykonać krok o podaną liczbę pulsów w stronę zamykania lub otwierania poprzez wciśnięcie jednego z dwóch przycisków. Pozwala to na zmianę położenia grzybka zaworu i przepływu z bardzo wysoką dokładnością. Kolejny obszar interfejsu (5) służy do obsługi pierwszego z zaproponowanych algorytmów detekcji wycieków. Operator ma możliwość odświeżyć obraz wzorcowy stanowiska, zatrzymać i wznowić monitorowanie. Wykrycie jest sygnalizowane zmianą koloru kontrolki. W ostatnim obszarze (6) użytkownik ma możliwość obsługi drugiego z algorytmów detekcji umożliwiającego kontrolę wybranych obszarów na podstawie monitorowania średniej wartości koloru w obszarze. W pierwszej opcji wykorzystania użytkownik wybiera moment zapisania referencyjnego średniego koloru w obszarach poprzez wciśnięcie przycisku. Może to zostać wykorzystane np. do monitorowania alarmowego poziomu oleju w zbiorniku. Wciśnięcie przycisku pozwala wtedy zapamiętać średnie wartości w stanie sprzed wystąpienia wycieku. Wystąpienie przekroczenia jest sygnalizowane zmianą koloru kontrolki tak samo jak w pierwszym algorytmie, w tym wypadku wprowadzono jednak dwie kontrolki odpowiadające dwóm miejscom przekroczeń np. poziomowi minimalny i maksymalnemu oleju w zbiorniku. W drugiej opcji użytkownik może wybrać automatyczne obliczanie wartości progowej na podstawie wybranej w programie przetwornika liczby poprzednich pomiarów. Program przetwornika zlicza wtedy liczbę przekroczeń progu odchylenia od tak obliczonej wartości referencyjnej, a następnie przesyła bezprzewodowo wartość przekroczeń w jednostce czasu do modułu BLE podłączonego do komputera. Jak zostało przedstawione w rozdziale 4.4 algorytm pozwala na zliczanie spadających kropel i oszacowanie na tej podstawie skali wycieku. Zarówno w przypadku pierwszego jak i drugiego algorytmu wystąpienie przekroczenia jest symbolizowane na wykresie poprzez stan wysoki na odpowiadającym mu kanale pomiarowym. Program pozwala również na zapisywanie wszystkich zmierzonych danych do pliku tekstowego wraz kanałem czasowym.

4.5.4 Podsumowanie

Przygotowany program w prosty sposób demonstruje możliwy sposób wdrożenia na stanowisku badawczym zaprojektowanych przetworników pomiarowych. Program pozwala na wyświetlanie wartości zmierzonych przez przetworniki, sygnalizowanie wycieku i kontrolę pracy ustawników pozycyjnych. Odbierane wartości są wyświetlane w postaci wykresów i pól numerycznych. System dopuszcza pewne niewielkie różnice odstępów czasowych pomiędzy kolejnymi pomiarami, ponieważ moment pomiaru jest ustalany na podstawie połączenia BLE. Testy wykazały działanie systemu zgodne z założeniami projektowymi. Pomimo swojej prostoty program może zostać wykorzystany jako baza do budowy bardziej skomplikowanego systemu.

Rozdział 5

Podsumowanie efektów pracy doktorskiej

Jak wskazano w rozdziale wprowadzającym oraz w załączniku 1, będącym podstawą do rozpoczęcia prac w ramach doktoratu wdrożeniowego, głównym celem prowadzonych prac badawczych była analiza możliwości wdrożenia inteligentnych rozwiązań dedykowanych Internetowi Rzeczy w laboratoriach testujących komponenty lotnicze oraz zaproponowanie innowacyjnych rozwiązań w tym zakresie. Tematyka przeglądu wiedzy i wybór zakresu wykonanych projektów były podyktowane poszukiwaniem odpowiedzi na postawione pytanie badawcze dotyczące zakresu i sposobu wdrożenia inteligentnych rozwiązań pomiarowych i wykonawczych w obszarze laboratoriów testujących komponenty lotnicze, zapewniającego jak największe korzyści w zakresie poprawy efektywności i ułatwienia prowadzenia badań. Wybrano trzy obszary badań: bezprzewodowe przetworniki pomiarowe, bezprzewodowe ustawniki pozycyjne kontrolujące pracę zaworów i systemy monitorowania wycieków. W każdym z etapów badań przykładano wagę do aspektu wdrożeniowego pracy, a zatem praktycznego wykorzystania w Sieci Badawczej Łukasiewicz - Instytucie Lotnictwa. W części projektowej pracy zostały przedstawione cztery przykłady wdrożenia bezprzewodowych przetworników inteligentnych.

W pierwszym etapie prac projektowo-badawczych udało się zaprojektować uniwersalny przetwornik pomiarowy o zasilaniu bateryjnym z opcjonalnym zasilaniem radiowo-bateryjnym, który może pracować z czujnikami powszechnie wykorzystywanymi w laboratoriach lotniczych. Zaprojektowany przetwornik może pracować przez wiele miesięcy, przy zasilaniu z niewielkiej baterii pastylkowej lub być zasilany drogą radiową z odległości kilkudziesięciu centymetrów. Podejście do pomiarów ukierunkowane na oszczędzanie energii, tworzy nową drogę dla sposobu przygotowywania instrumentacji pomiarowej w testach komponentów lotniczych. Czas pracy przy zasilaniu bateryjnym przewyższa wielokrotnie możliwości rozwiązań dostępnych na rynku. Pozwala to patrzeć na przetworniki bezprzewodowe już nie jako na urządzenia stosowane w szczególnych, sporadycznych przypadkach testowych, ale jako na realną alternatywę dla przewodowej komunikacji czujników z kartami pomiarowymi. Ponadto, instrumentacja stanowisk testowych może zostać szybciej przygotowana i łatwiej jest kontynuować badania w kolejnych laboratoriach ze względu na mobilność torów pomiarowych.

Wyniki prac w drugim z prowadzonych projektów udowadniają, że wykorzystanie inteligentnych przetworników pomiarowych oferuje również szerokie perspektywy w obszarze pomiarów wykonywanych na komponentach o wysokich prędkościach obrotowych. Udało się skonstruować wielokanałowy moduł telemetryczny zasilany indukcyjnie mogący pracować z prędkością obrotową 20000 obr./min. Zastosowane rozwiązania znacznie uprościły konstrukcję w stosunku do obecnie stosowanych modułów telemetrycznych, co umożliwi szersze wdrożenie telemetrii obrotowej w laboratoriach. Obecnie telemetria dedykowana wysokim prędkościom obrotowym jest uważana za rozwiązanie drogie i przez to trudne we wdrożeniu w kampaniach testowych o ograniczonych budżetach. Redukcja kosztów pozwala zwiększyć liczbę testowanych komponentów, co może mieć wpływ na podniesienie bezpieczeństwa eksploatacji w docelowych zastosowaniach. Wdrożenie obrotowego przetwornika pomiarowego znacznie zwiększa potencjał testowy Laboratorium Badania Łożysk, przez umożliwienie wykonywania pomiarów telemetrycznych w długoterminowych badaniach elementów obrotowych, co było do tej pory poza zakresem możliwości laboratorium.

Trzeci etap prac projektowo-badawczych pokazuje, że inteligentne rozwiązania bezprzewodowe mogą mieć wpływ nie tylko na sposób wykonywania pomiarów w laboratoriach, ale pozwalają również zaproponować nowe podejście do elementów wykonawczych. Wprowadzona metoda sterowania pozwoliła na osiągnięcie dokładności regulacji wielokrotnie przekraczającej możliwości ustawników pozycyjnych dostępnych na rynku. Jednocześnie udało się zredukować zużycie energii do poziomu zapewniającego pracę przy zasilaniu bateryjnym przez wiele miesięcy. Zaproponowanie ustawnika bezprzewodowego zasilanego bateryjnie, który może pracować przez długi czas bez wymiany baterii i zapewnia wysoką precyzję regulacji, tworzy nową grupę urządzeń wykonawczych, która może znacznie zwiększyć elastyczność konfiguracji i skrócić czas przygotowania kampanii testowych.

Ostatni projekt demonstruje, że wprowadzenie inteligentnych układów w obszarze pomiarowym może przynieść w prosty sposób znaczne korzyści w zakresie poprawy efektywności monitorowania przebiegu badań. Zaproponowane algorytmy bazujące na metodach analizy obrazu pozwalają poprawić efektywność monitorowania wycieków przy niskim koszcie wdrożenia. Dzięki temu, że są one dopasowane bezpośrednio do wymagań laboratoriów lotniczych, oferują wysoką efektywność przy niższym poziomie skomplikowania systemu w stosunku do obecnie dostępnych rozwiązań bazujących na uczeniu maszynowym.

System pomiarowy składający się z opisanych powyżej inteligentnych urządzeń pomiarowych charakteryzuje się wysoką elastycznością konfiguracji, wyróżniającą system na tle innych systemów pomiarowych stosowanych w laboratoriach. Przetworniki pracujące z różnymi częstotliwościami pomiarowymi mogą pracować w sieci bezprzewodowej o strukturze drzewa lub komunikować się bezpośrednio z urządzeniami takimi jak komputer przenośny lub telefon. W najprostszych przypadkach testowych do budowy systemu pomiarowego może zostać wykorzystany komputer (z wbudowanym lub zewnętrznym modułem BLE) odpowiadający jednocześnie za wizualizację, rejestrację danych pomiarowych i kontrolę urządzeń wykonawczych.

Wnioski z prac projektowo-badawczych potwierdzają postawioną tezę, według której możliwe jest usprawnienie procesu przygotowywania badań komponentów lotniczych i uzyskanie nowych możliwości badawczych poprzez wprowadzenie w laboratoriach bezprzewodowych inteligentnych przetworników i układów pomiarowych projektowanych z uwzględnieniem specyfiki testów komponentów lotniczych. Uwzględnienie wymagań laboratoriów lotniczych w każdym z projektów pozwoliło na uzyskanie nowych możliwości w poszczególnych badanych obszarach. Zgodnie z założeniami, projektowanie ukierunkowane na oszczędzanie energii umożliwiło uzyskanie długiego czasu pracy przy zasilaniu bateryjnym, niespotykanego w literaturze. Niskie zużycie energii pozwoliło również na zwiększenie możliwości zasilania bezprzewodowego. Przedstawione nowe podejście do metod regulacji przepływu i monitorowania wycieków z pewnością usprawni pracę laboratoriów. Praca spełnia również wymagania stawiane przed doktoratem wdrożeniowym odnośnie wykorzystania wyników badań w miejscu zatrudnienia. Wszystkie zaprezentowane rozwiązania mają potencjał wdrożeniowy, a niektóre z nich były już wykorzystane podczas prowadzonych badań w Sieci Badawczej Łukasiewicz - Instytucie Lotnictwa. Wymagania postawione we wniosku o rozpoczęcie doktoratu wdrożeniowego zostały wypełnione w całości i rozszerzone o analizę sposobów monitorowania stanowisk z wykorzystaniem analizy obrazu. Zróżnicowany wybór obszarów badań pozwolił na szerokie sprawdzenie perspektyw wdrożenia inteligentnych rozwiązań bezprzewodowych, z uwzględnieniem najważniejszych aspektów pracy laboratoriów testujących komponenty lotnicze. Uzyskane wyniki badań oraz wnioski zostały udokumentowane nie tylko w formie rozprawy doktorskiej, ale również w postaci artykułów w recenzowanych czasopismach naukowych o tematyce z zakresu pomiarów, nowoczesnej elektroniki oraz lotnictwa. Każdemu z czterech projektów omawianych w rozdziałach 4.1-4.4 odpowiada jeden artykuł [147–149] (artykuł dotyczący rozdziału 4.3 jest w przygotowaniu do publikacji i zostanie opublikowany po zakończeniu prac nad rozprawą doktorską). Ponadto wyniki prac były demonstrowane na wielu seminariach (w tym seminarium Oddziału Instrumentation & Measurement Polskiej Sekcji IEEE) oraz na konferencji COE2024 (17th International Conference on Optical Sensors and Electronic Sensors), gdzie wystąpienie zostało wyróżnione.

Zebrane wnioski i wyniki badań poruszają jedne z najistotniejszych kwestii z punktu widzenia wdrożenia inteligentnych rozwiązań pomiarowych i wykonawczych w laboratoriach lotniczych, jednak jest wiele innych obszarów, w których można szukać usprawnień. Oprócz dalszego rozwoju przedstawionych rozwiązań, przyszłe prace mogą dotyczyć prób zasilania przetworników z energii procesu, metod monitorowania stanowisk na podstawie analizy dźwięku oraz usprawnień w sposobie organizacji gospodarki magazynowej części zamiennych do stanowisk badawczych. Coraz więcej mówi się również o wbudowywaniu rozwiązań pomiarowych bezpośrednio w komponenty np. łożyskach inteligentnych wyposażonych w monitoring drgań i temperatury. Możliwe, że w przyszłości laboratoria lotnicze będą musiały być przygotowane na to, że już sam obiekt testowy będzie miał cechy inteligentnego układu pomiarowego, z którym należy skomunikować się podczas wykonywania badań.

Bibliografia

- [1] Grant, R., „Flight: The Complete History of Aviation”, *Smitsonian*, s. 1–10, 2022.
- [2] Kowalska, P., „Bezpieczeństwo pasażerów statków powietrznych - wybrane zagadnienia”, *Security, Economy and Law*, nr. 27, s. 33–49, lut. 2020. DOI: 10.24356/SEL/27/3.
- [3] Kaiser, S., „Multidisciplinary Design of Aeronautical Composite Cycle Engines”, prac. dokt., Technische Universität München, sty. 2020, s. 7–8. DOI: 10.13140/RG.2.2.14056.21764.
- [4] Schütze, A., Helwig, N. i Schneider, T., „Sensors 4.0 – smart sensors and measurement technology enable Industry 4.0”, *Journal of Sensors and Sensors Systems*, t. 7, s. 359–371, maj 2018. DOI: 10.5194/jsss-7-359-2018.
- [5] Kuś, A. i Pyłacz, P., „The Importance of Information Management in the Context of Industry 4.0: Evidence from the Kuyavian-Pomeranian Forbes Diamonds”, *Social Sciences*, t. 8, nr. 6, 2019. DOI: 10.3390/socsci8060169.
- [6] Sharma, A., Sharma, S. i Gupta, D., „A Review of Sensors and Their Application in Internet of Things (IOT)”, *International Journal of Computer Applications*, t. 174, s. 27–34, mar. 2021. DOI: 10.5120/ijca2021921148.
- [7] Kumar, S., Tiwari, P. i Zymbler, M., „Internet of Things is a revolutionary approach for future technology enhancement: a review”, *Journal of Big Data*, t. 6, nr. 111, grud. 2019. DOI: 10.1186/s40537-019-0268-2.
- [8] Karakuş, G., Karşıgil, E. i Polat, L., „The Role of IoT on Production of Services: A Research on Aviation Industry”, s. 503–511, sty. 2019, Materiały pokonferencyjne - International Symposium for Production Research 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-92267-6_43.
- [9] Krishna, V. i Padshah, K. S., „Current Internet Of Things: A Modernity”, *International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT)*, t. 11, nr. 5, maj 2023, ISSN: 2320-2882. adr.: <https://ijcrt.org/papers/IJCRT2305976.pdf>.
- [10] Kramp, T., Kranenburg, R. i Lange, S., *Enabling Things to Talk: Designing IoT solutions with the IoT Architectural Reference Model*. Springer, 2013, s. 1–10. DOI: 10.1007/978-3-642-40403-0_1.
- [11] „IoT w polskiej gospodarce - raport grupy roboczej do spraw Internetu Rzeczy przy ministerstwie cyfryzacji”, Ministertwo Cyfryzacji, kw. 2019. adr.: <https://www.gov.pl/attachment/82ad18f8-2ac1-4433-a1ea-f887b522e46b>.

- [12] Henkel, J., Pagani, S., Amrouch, H., Bauer, L. i Samie, F., „Ultra-Low Power and Dependability for IoT Devices (Special session paper)”, mar. 2017, s. 954–959. DOI: 10.5555/3130379.3130608.
- [13] Pech, M., Vrchota, J. i Bednář, J., „Predictive Maintenance and Intelligent Sensors in Smart Factory: Review”, *Sensors*, t. 21, nr. 4, 2021. DOI: 10.3390/s21041470.
- [14] „Engine System and Component Tests”, *U.S. Department of Transportation - Advisory Circular*, nr. 33.91-1, grud. 2010. adr.: https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC-33.91-1.pdf.
- [15] Fabry, S., Spodniak, M., Gasparovic, P. i Koscak, P., „Aircraft Gas Turbine Engine Testing”, *Acta Avionica Journal*, t. 21, s. 39–44, grud. 2019. DOI: 10.35116/aa.2019.0016.
- [16] Wiśniowski, W., „Instytut Lotnictwa - niestandardowa droga do sukcesu”, *Prace Instytutu Lotnictwa*, nr. 5 (214), s. 33–39, 2011. adr.: https://ilot.edu.pl/prace_ilot/public/PDF/spis_zeszytow/214_2011/05.pdf.
- [17] „Guidelines for Engine Component Tests - ARP5757A”, SAE Aerospace, paź. 2016. adr.: <https://www.sae.org/standards/content/arp5757a/>.
- [18] „Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment.”, RTCA Inc., nr. DO-160, 2023. adr.: <https://do160.org/rtca-do-160g/>.
- [19] He, Z., Haijun, X. i Bai, C., „A Blade Release Method for FBO Test”, *Experimental Techniques*, t. 42, s. 311–318, lut. 2018. DOI: 10.1007/s40799-018-0233-6.
- [20] Manikandan, L. i in., „Testing of main shaft bearing of typical aero engine”, *Matertiały pokonferencyjne, Madras*, sty. 2018. adr.: https://www.researchgate.net/publication/322419376_TESTING_OF_MAIN_SHAFT_BEARING_OF_A_TYPICAL_AERO_ENGINE.
- [21] Wiśniowski, W., *Tunele aerodynamiczne w Polsce na tle tuneli światowych*. Wydawnictwa Naukowe Instytutu Lotnictw, 2016, ISBN: 978-83-63539-28-3.
- [22] Wichniarz, M., „Certification of Testing Laboratories – The Basis of Reliability Among Research Vendors in Aviation”, *Fatigue of Aircraft Structures*, t. 2021, s. 99–105, grud. 2021. DOI: 10.2478/fas-2021-0009.
- [23] Deng, T., „Design and Implementation of Laboratory Safety Management System in Universities Based on Internet of Things Technology”, grud. 2021, s. 621–625. DOI: 10.1145/3510858.3511340.
- [24] DeAnna, R., „Wireless Telemetry for Gas-Turbine Applications”, NASA Technical Reports Server (NTRS), mar. 2000. adr.: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA375861.pdf>.
- [25] Imay, M., Cranley, N. i Atman, O., „UDP based wireless telemetry network and data acquisition system for rotary application”, *Materiały pokonferencyjne - International Telemetering Conference, Arizona*, t. 48, paź. 2012, ISSN: 0884-5123. adr.: <https://repository.arizona.edu/handle/10150/581823>.

- [26] Farman, J. R., „Wireless RF Telemetry for Rotating Frame Data Acquisition and Control”, wrz. 2016, Materiały pokonferencyjne - XXIII Biannual Symposium on Measuring Techniques in Turbomachinery, Studgard, Germany. DOI: 10.17863/CAM.40671.
- [27] Pittaway, N., „Flight test instrumentation – without wires”, *Aerospace Testing International*, lip. 2019. adr.: <https://www.aerospacetestinginternational.com/features/flight-test-instrumentation-without-wires.html>.
- [28] Rejith, R., Kesavan, D., Chakravarthy, P. i Narayana Murty, S., „Bearings for aerospace applications”, *Tribology International*, t. 181, 2023. DOI: 10.1016/j.triboint.2023.108312.
- [29] Bashir, I., Wang, L., J Harvery, T., Zaghari, B., S Weddell, A. i M White, N., „Integrated smart bearings for next generation aero-engines Part 1: Development of a sensor suite for automatic bearing health monitoring”, Materiały pokonferencyjne - 1st World Congress on Condition Monitoring, WCCM2017, czer. 2017, s. 704–714, ISBN: 9781510844759. adr.: <https://www.bindt.org/events/PastEvents/WCCM-2017/>.
- [30] Yang, H., Kumara, S., Bukkapatnam, S. T. i Tsung, F., „The internet of things for smart manufacturing: A review”, *IIE Transactions*, t. 51, nr. 11, s. 1190–1216, 2019. DOI: 10.1080/24725854.2018.1555383.
- [31] Bousdekis, A., Mentzas, G., Hribernik, K., Lewandowski, M., Stietencron, M. von i Thoben, K.-D., „A Unified Architecture for Proactive Maintenance in Manufacturing Enterprises”, w kw. 2019, s. 307–317, ISBN: 978-3-030-13692-5. DOI: 10.1007/978-3-030-13693-2_26.
- [32] „Developing Smart Tools for the Airbus Factory of the Future - Case Study”, National Instruments, 2015. adr.: https://www.iiconsortium.org/case-studies/Ni-Airbus_case_study.pdf.
- [33] Korchagin, A., Deniskina, A. i Fateeva, I., „Lean and energy efficient production based on internet of things (IOT) in aviation industry”, *International Science Conference SPbWOSCE-2018 “Business Technologies for Sustainable Urban Development”*, t. 110, s. 2124, sierp. 2019. DOI: 10.1051/e3sconf/201911002124.
- [34] „Control valve handbook”, Emerson, 2023. adr.: <https://www.emerson.com/documents/automation/control-valve-handbook-en-3661206.pdf>.
- [35] Cheng, Q. i in., „Research on control algorithm of intelligent valve positioner based on parameter self-tuning”, s. 1380–1385, 2020, Materiały pokonferencyjne - 2020 39th Chinese Control Conference (CCC). DOI: 10.23919/CCC50068.2020.9188582.
- [36] Kalaiselvi, B., „Design of Smart Positioner for a Control Valve to Optimise Backlash Problem”, *Indian Journal of Science and Technology*, t. 8, nr. 32, list. 2015. DOI: 10.17485/ijst/2015/v8i32/87454.

- [37] Yan, F., Li, M., Hou, X. i Long, Y., „A software and hardware design scheme of intelligent valve positioner”, t. 268, 2021, Materiały pokonferencyjne - 2020 6th International Symposium on Vehicle Emission Supervision and Environment Protection (VESEP2020). DOI: 10.1051/e3sconf/202126801067.
- [38] Xu, W., Xiao, C. i Huang, M., „Research on Control System of Intelligent Valve Positioner”, s. 653–656, list. 2019, Materiały pokonferencyjne - 2nd World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing (WCMEIM). DOI: 10.1109/WCMEIM48965.2019.00138.
- [39] Gu, L., Ge, X., Yao, X.-D. i Jiang, B., „Design of Intelligent Valve Positioner”, *Applied Mechanics and Materials*, t. 241-244, s. 552–556, grud. 2012. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.241-244.552.
- [40] Zhang, B., Jiang, A., Jiang, J., Qi, Y., Xue, L. i Wang, Y., „A New Positioning Strategy Based on Parameter Tuning and Optimal Control Technique for Pneumatic Control Valve”, *Actuators*, t. 11, wrz. 2022. DOI: 10.3390/act11100279.
- [41] Bai, Y. i Bai, Q., „Leak Detection Systems”, Bai, Y. i Bai, Q., red., s. 125–143, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394432-0.00006-8>.
- [42] Jun, Z., Peter, H. i Twomey, M., „Overview of pipeline leak detection technologies”, Atmos International, 2018. adr.: <https://asgmt.com/wp-content/uploads/2018/10/106.pdf>.
- [43] Fiedler, J., „An overview of pipeline leak detection technologies”, adr.: <https://asgmt.com/wp-content/uploads/2018/10/106.pdf>.
- [44] Qahtani, T., Yaakob, S., Yidris, N., Sulaiman, S. i Ahmad, K., „A Review on Water Leakage Detection Method in the Water Distribution Network”, *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, t. 68, s. 152–163, mar. 2020. DOI: 10.37934/arfmts.68.2.152163.
- [45] Ahmed, N., Xiandong, M. i George, A., „State-of-the-art in leak detection and localization”, t. 1136, s. 193–198, lip. 2022, Materiały pokonferencyjne - 14th International Conference on Hydroinformatics, Bucharest. DOI: 10.1088/1755-1315/1136/1/012052.
- [46] Fan, H., Tariq, S. i Zayed, T., „Acoustic leak detection approaches for water pipelines”, *Automation in Construction*, t. 138, s. 104 226, 2022, ISSN: 0926-5805. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104226.
- [47] Arjona Ramírez, M. i Borges, L., „Acoustic Water Leak Detection System”, sty. 2010. DOI: 10.14209/sbrt.2010.117.
- [48] Xu, Y. i in., „Pipeline Leak Detection Using Raman Distributed Fiber Sensor With Dynamic Threshold Identification Method”, *IEEE Sensors Journal*, t. 20, nr. 14, s. 7870–7877, 2020. DOI: 10.1109/JSEN.2020.2980366.

- [49] Jochan, F. i Tobias, W., „Pipeline Leak Detection using Distributed Fiber Optic Sensing”, *Pipeline inspection and control*, lut. 2010. adr.: <https://www.ilf.com/news/publications/?pl=5&download-id=11111>.
- [50] Geiger, G., „State-of-the-art in leak detection and localization”, t. 32, s. 193–198, grud. 2006. adr.: https://www.researchgate.net/publication/290631637_State-of-the-art_in_leak_detection_and_localization.
- [51] „Spills and Leak Detection”, 2024, Visionify, term. wiz. 20.05.2024. adr.: <https://visionify.ai/spills-and-leaks-detection/>.
- [52] „Automate leak detection with AI-powered cameras”, 2024, IntelliView Technology, term. wiz. 20.05.2024. adr.: <https://www.intelliviewtech.com/>.
- [53] Bao, N., Fan, Y., Ye, Z. i Simeone, A., „A Machine Vision—Based Pipe Leakage Detection System for Automated Power Plant Maintenance”, *Sensors*, t. 22, lut. 2022. DOI: 10.3390/s22041588.
- [54] Lyu, C., Zhang, M., Li, B., Liu, Y. i Lin, X., „High Reliability Pipeline Leakage Detection Based on Machine Vision in Complex Industrial Environment”, *IEEE Sensors Journal*, t. 22, nr. 21, 2022. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3206456.
- [55] Lyu, C., Zhang, M., Li, B., Liu, Y. i Lin, X., „High Reliability Pipeline Leakage Detection Based on Machine Vision in Complex Industrial Environment”, *IEEE Sensors Journal*, t. 22, nr. 21, 2022. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3206456.
- [56] Miar, G. U., „Międzynarodowy Słownik Terminów Metrologii Prawnej”, 2015. adr.: https://www.gum.gov.pl/ftp/pdf/Wydawnictwa/Miedzynarodowy_Slownik_Terminow_Metrologii_Prawnej.pdf.
- [57] Fraden, J., „Handbook of Modern Sensors – Physics, Design, and Applications”, *Springer*, s. 196–197, 2010. DOI: 10.1007/978-1-4419-6466-3.
- [58] Kołtątaj, J., „Inteligentne czujniki w projektowaniu systemów automatyki, pomiarów i sterowania”, *Wiadomości Elektrotechniczne*, t. 79, nr. 4, s. 42–45, 2011. adr.: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:107019814>.
- [59] Elmenreich, W. i Pitzek, S., „Smart Transducers - Principles, Communications, and Configuration”, t. 7, s. 510–515, kw. 2003, Materiały pokonferencyjne - 7th IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems. DOI: 10.1.1.14.8516<-notworking.
- [60] Wyżgolik, R., „IEEE 1451 - interfejs przetwornika inteligentnego”, *Pomiary Automatyka Kontrola*, t. 53, nr. 9, s. 723–726, 2007. adr.: <https://home.agh.edu.pl/~km2007/misc/papers/49.pdf>.
- [61] Mocnej, J., Miškuf, M., Papcun, P. i Zolotová, I., „Impact of Edge Computing Paradigm on Energy Consumption in IoT”, *IFAC-PapersOnLine*, t. 51, nr. 6, s. 162–167, 2018, Materiał pokonferencyjne - 15th IFAC Conference on Programmable Devices and Embedded Systems PDeS 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.07.147>.

- [62] Chi, H. R., „Editorial: Edge Computing for the Internet of Things”, *Journal of Sensor and Actuator Networks*, t. 12, nr. 1, 2023. DOI: 10.3390/jsan12010017.
- [63] Llobet, E., Carlos-Mancilla, M., López-Mellado, E. i Siller, M., „Wireless Sensor Networks Formation: Approaches and Techniques”, *Journal of Sensors*, 2016. DOI: 10.1155/2016/2081902.
- [64] Makowski, L., „Transmisja i przetwarzanie danych w sieciach czujnikowych pozyskujących energię z otoczenia”, s. 7–38, maj 2017. adr.: https://www.researchgate.net/publication/318654692_Transmisja_i_przetwarzanie_danych_w_sieciach_czujnikowych_pozyskujacych_energie_z_otoczenia.
- [65] Tapia, E., Sastoque-Pinilla, L., Lopez-Novoa, U., Bediaga, I. i López de Lacalle, N., „Assessing Industrial Communication Protocols to Bridge the Gap between Machine Tools and Software Monitoring”, *Sensors*, t. 23, nr. 12, 2023. DOI: 10.3390/s23125694.
- [66] Hunter, G., Stetter, J., Hesketh, P. i Liu, C. C., „Smart Sensor Systems”, *Nanodevices and Nanomaterials for Ecological Security*, t. 20, mar. 2012. DOI: 10.1007/978-94-007-4119-5_19.
- [67] Djadour, I., Aidel, S. i Medkour, H., „Design and implementation of low power consumption wireless sensor node”, t. 17, s. 2729–2734, wrz. 2019. DOI: 10.12928/telkomnika.v17i6.
- [68] Khalifeh, A., Mazunga, F., Nechibvute, A. i Nyambo, B. M., „Microcontroller Unit-Based Wireless Sensor Network Nodes: A Review”, *Sensors*, t. 22, nr. 22, 2022. DOI: 10.3390/s22228937.
- [69] „nRF52840 product specification v1.1”, Nordic Semiconductor, 2019. adr.: https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF52840_PS_v1.1.pdf.
- [70] Saari, M., Baharudin, A. M. bin i Hyrynsalmi, S., „Survey of Prototyping Solutions Utilizing Raspberry Pi”, *MIPRO 2017 - 40th Jubilee International Convention At: Opatija, Croatia*, maj 2017. DOI: 10.23919/MIPRO.2017.7973568.
- [71] Dhiman, R. i Thakur, J., „Evolution of WSN into WSN-IoT: A Study on its Architecture and Integration Challenges”, *International Conference on Innovative Computing and Communications*, s. 185–207, list. 2022. DOI: 10.1007/978-981-19-3679-1_14.
- [72] Czapski, P., „Bezprzewodowe i mobilne sieci sensoryczne – stan wiedzy”, *Prace Instytutu Lotnictwa*, t. 221, s. 26–46, sty. 2011. adr.: https://www.researchgate.net/publication/288341689_Bezprzewodowe_i_mobilne_sieci_sensoryczne_-_stan_wiedzy.
- [73] Wang, Q. i Balasingham, I., „Wireless Sensor Networks - An Introduction”, grud. 2010. DOI: 10.5772/13225.
- [74] Natgunanathan, I., Fernando, N., Loke, S. i Weerasuriya, C., „Bluetooth Low Energy Mesh: Applications, Considerations and Current State-of-the-Art.”, *Sensors*, t. 23, maj 2023. DOI: 10.3390/s23041826.

- [75] Moreno-Cruz, F., Toral-López, V., Escobar-Molero, A., Ruíz, V. U., Rivadeneyra, A. i Morales, D. P., „Ultra-Low Power Wireless Communication Protocol for IoT and Energy Harvesting”, *Journal of Sensors and Sensors Systems*, t. 20, paź. 2020. DOI: 10.3390/s20216156.
- [76] Roges, R., „Communication Protocols for Smart Sensors in IoT Applications”, *International Journal of Intelligent Communication, Computing and Networks*, t. 1, s. 22–29, sty. 2021. DOI: 10.51735/ijiccn/001/13.
- [77] Tian, L., Santi, S., Seferagic, A., Ian, J. i Famaey, J., „Wi-Fi HaLow for the Internet of Things: An up-to-date survey on IEEE 802.11ah research”, *Journal of Network and Computer Applications*, t. 182, mar. 2021. DOI: 10.1016/j.jnca.2021.103036.
- [78] Woolley, M., „Bluetooth Core Specification Version 5.2 Feature Overview”, Bluetooth Special Interest Group, grud. 2020. adr.: https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/2020/01/Bluetooth_5.2_Feature_Overview.pdf.
- [79] Gomez, C., Oller, J. i Paradells, J., „Overview and Evaluation of Bluetooth Low Energy: An Emerging Low-Power Wireless Technology”, *Sensors*, t. 12, nr. 9, 2012. DOI: 10.3390/s120911734.
- [80] Li, S., Zhang, Y. i M., H., „Bluetooth Low Energy Tree Structure Network”, Texas Instruments, report SWRA648, maj 2019. DOI: 10.3390/sym12040579.
- [81] Raj, A. i Steingart, D., „Review—Power Sources for the Internet of Things”, t. 165, nr. 8, kw. 2018. DOI: 10.1149/2.0181808jes.
- [82] Dementyev, A., Hodges, S., Taylor, S. i Smith, J., „Power Consumption Analysis of Bluetooth Low Energy, ZigBee and ANT Sensor Nodes in a Cyclic Sleep Scenario”, *Sensors*, t. 12, kw. 2013, Materiały pokonferencyjne - IEEE International Wireless Symposium. DOI: 10.1109/IEEE-IWS.2013.6616827.
- [83] Shinohara, N., „History and Innovation of Wireless Power Transfer via Microwaves”, *IEEE Journal of Microwaves*, t. 1, s. 218–228, sty. 2021. DOI: 10.1109/JMW.2020.3030896.
- [84] Kuka, S., Ni, K. i Alkahtani, M., „A Review of Methods and Challenges for Improvement in Efficiency and Distance for Wireless Power Transfer Applications”, *Power Electronics and Drives*, t. 5 (40), s. 1–25, 2020. DOI: 10.2478/pead-2020-0001.
- [85] „System Reference document (SRdoc) - Wireless Power Transmission (WPT) systems operating below 30 MHz”, ETSI, 2019. adr.: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/103400_103499/103493/01.01.01_60/tr_103493v010101p.pdf.
- [86] Nguyen, M. i in., „Electromagnetic Field Based WPT Technologies for UAVs: A Comprehensive Survey”, *Electronics*, t. 9, mar. 2020. DOI: 10.3390/electronics9030461.
- [87] Rajendra, J. i D., S., „A Review on Wireless Power Transfer New Paradigm for Low Power Devices”, *International Conference on Innovative Computing and Communication (ICICC)*, sty. 2022. DOI: 10.2139/ssrn.4019671.

- [88] Bohare, A., „Study of Wireless Power Transfer”, Materiały pokonferencyjne - International E-Conference On Mathematical And Statistical Sciences: A Selcuk Meeting 2021, czer. 2021. adr.: https://www.researchgate.net/publication/352121591_Study_of_Wireless_Power_Transfer.
- [89] Detka, K. i Górecki, K., „Wireless Power Transfer—A Review”, *Energies*, t. 15, nr. 19, paź. 2022. DOI: 10.3390/en15197236.
- [90] Van Mulders, J. i in., „Wireless Power Transfer: Systems, Circuits, Standards, and Use Cases.”, *Sensors*, t. 22, nr. 15, 2022. DOI: 10.3390/s22155573.
- [91] Laha, A., Kalathy, A., Pahlevani, M. i Jain, P., „A Comprehensive Review on Wireless Power Transfer Systems for Charging Portable Electronics”, *Eng*, t. 4, nr. 2, s. 1023–1057, 2023. DOI: 10.3390/eng4020061.
- [92] Degen, C., „Inductive coupling for wireless power transfer and near-field communication”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, t. 121, maj 2021. DOI: 10.1186/s13638-021-01994-4.
- [93] Abdolkhani, A., „Fundamentals of Inductively Coupled Wireless Power Transfer Systems”, w *Wireless Power Transfer*, IntechOpen, 2016, rozdz. 1. DOI: 10.5772/63013. adr.: <https://doi.org/10.5772/63013>.
- [94] Ali, E. M., Alibakhshikenari, M., Virdee, B. S., Soruri, M. i Limiti, E., „Efficient Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling Using Automated Impedance Matching Circuit”, *Electronics*, t. 10, nr. 22, 2021. DOI: 10.3390/electronics10222779.
- [95] Umetani, K., Honjo, T., Koyama, T., Ishihara, M. i Hiraki, E., „Receiving-coil structure reducing stray AC resistance for resonant coupling wireless power transfer”, *IET Power Electronics*, t. 12, s. 2338–2344, lip. 2019. DOI: 10.1049/iet-pe1.2018.5358.
- [96] Abou Houran, M., Yang, X. i Chen, W., „Magnetically Coupled Resonance WPT: Review of Compensation Topologies, Resonator Structures with Misalignment, and EMI Diagnostics”, *Electronics*, t. 7, nr. 11, 2018. DOI: 10.3390/electronics7110296.
- [97] „Introduction to the Power Class 0 Specification”, *Qi technical specification*, Wireless Power Consortium, lut. 2017. adr.: <https://faculty-web.msoe.edu/johnsontimmoj/ELE4142/files4142/Qi-PC0-introduction-v1.2.3.pdf>.
- [98] „AirFuel Alliance Resonant Wireless Power Transfer (WPT) System Baseline System Specification (BSS)”, AirFuel Alliance, lip. 2018, term. wiz. 05.04.2024. adr.: <https://airfuel.org/>.
- [99] Liu, L., Guo, X., Liu, W. i Lee, C., „Recent Progress in the Energy Harvesting Technology-From Self-Powered Sensors to Self-Sustained IoT, and New Applications”, *Nanomaterials*, t. 11, list. 2021. DOI: 10.3390/nano11112975.
- [100] Xia, L. i in., „A Wind-Solar Hybrid Energy Harvesting Approach Based on Wind-Induced Vibration Structure Applied in Smart Agriculture”, *Micromachines*, t. 14, nr. 58, 2023. DOI: 10.3390/mi14010058.

- [101] Ibrahim, H. H. i in., „Radio Frequency Energy Harvesting Technologies: A Comprehensive Review on Designing, Methodologies, and Potential Applications”, *Sensors*, t. 22, nr. 11, 2022. DOI: 10.3390/s22114144.
- [102] Le-Giang, T., Hyouk-Kyu, C. i Woo-Tae, P., „RF power harvesting: a review on designing methodologies and applications”, *Micro and Nano Systems Letters*, t. 14, lut. 2017. DOI: 10.1186/s40486-017-0051-0.
- [103] Merenda, M., Della Corte, F. i Felini, C., „Dynamic impedance matching network for RF energy harvesting systems”, *IEEE RFID Technology and Applications Conference RFID-TA*, wrz. 2014. DOI: 10.1109/RFID-TA.2014.6934206.
- [104] Elahi, H., Munir, K., Eugeni, M., Atek, S. i Gaudenzi, P., „Energy Harvesting towards Self-Powered IoT Devices”, *Energies*, t. 13, nr. 21, 2020. DOI: 10.3390/en13215528.
- [105] Pakkirisami, C. i in., „A Fully-Integrated Ambient RF Energy Harvesting System with 423 mW Output Power”, *Sensors*, t. 22, nr. 12, 2022. DOI: 10.3390/s22124415.
- [106] Shen, S., Zhang, Y., Chiu, C.-Y. i Murch, R., „An Ambient RF Energy Harvesting System Where the Number of Antenna Ports is Dependent on Frequency”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, t. 67, s. 3821–3832, kw. 2019. DOI: 10.1109/TMTT.2019.2906598.
- [107] Bouchouicha, D., Dupont, F., Latrach, M. i Ventura, L., „Ambient RF Energy Harvesting”, *Renewable Energy and Power Quality Journal*, t. 1, kw. 2010. DOI: 10.24084/repqj08.652.
- [108] Chen, J. i Huang, S., „Analysis and Comparison of UART, SPI and I2C”, *IEEE 2nd International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA)*, s. 272–276, 2023. DOI: 10.1109/EEBDA56825.2023.10090677.
- [109] Pang, A. i Membrey, P., „Two-Way Communications with Your Raspberry Pi: SPI”, *Beginning FPGA: Programming Metal*, s. 347–366, grud. 2017. DOI: 10.1007/978-1-4302-6248-0_15.
- [110] Dhaker, P., „Introduction to SPI Interface”, *Analog Dialogue*, wrz. 2018, Analog Devices. adr.: <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/introduction-to-spi-interface.html>.
- [111] Kardaś, M., „Mikrokontrolery AVR. Język C - podstawy programowania.”, *BTC*, 2013.
- [112] Bashir, S., Ali, S., Ahmed, S. i Kakkar, V., „Analog-to-digital converters: A comparative study and performance analysis”, maj 2016, s. 999–1001. DOI: 10.1109/CCAA.2016.7813861.
- [113] Dalmia, H. i Sinha, S., „Analog to Digital Converters (ADC): A Literature Review”, *E3S Web of Conferences*, t. 184, s. 01025, sty. 2020. DOI: 10.1051/e3sconf/202018401025.
- [114] „MAX11410 product specification”, Maxim Integrated, 2019. adr.: <https://www.maximintegrated.com/en/products/analog/data-converters/analog-to-digital-converters/MAX11410.html>.

- [115] Baker, B., „Improving Temperature Sensor Accuracy for Thermocouples and RTDs with Delta-Sigma Converters”, *All about circuits*, Maxim Integrated, kwiet. 2019. adr.: <https://www.allaboutcircuits.com/industry-articles/improving-temperature-sensor-accuracy-thermocouples-RTDs-with-delta-sigma/>.
- [116] Gonzalez, R. i Woods, R. E., „Digital image processing”, *Pearson*, s. 47–83, 2018. adr.: <https://dl.icdst.org/pdfs/files4/01c56e081202b62bd7d3b4f8545775fb.pdf>.
- [117] Rybchak, Z. i Basystiuk, O., „Analysis of computer vision and image analysis technics”, *Econtechmod. An International Quarterly Journal*, t. 6, nr. 2, s. 79–84, maj 2017. adr.: https://asoiu-computertengineering.com/ArticlePdf/Analysis_of_computer_vision_and_ima.pdf.
- [118] Materka, A. i Strumiłło, P., „Wstęp do komputerowej analizy obrazów”, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Łódzkiej*, 2009. adr.: https://www.researchgate.net/publication/256079247_Wstep_do_komputerowej_analzy_obrazow.
- [119] M. Denkowski, P. M., „Przetwarzanie obrazów cyfrowych – laboratorium”, *Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie*, 2011. adr.: <https://www.scribd.com/document/488707323/Przetwarzanie-obrazow-cyfrowych-laboratorium-denkowski-pdf>.
- [120] Vacavant, A., Chateau, T., Wilhelm, A. i Evre, L., „A Benchmark Dataset for Outdoor Foreground/Background Extraction”, list. 2012, Materiały pokonferencyjne - Computer Vision-ACCV 2012 Workshops. DOI: 10.1007/978-3-642-37410-4_25.
- [121] Dwivedi, N., Singh, D. i Kushwaha, D., „An Approach for Unattended Object Detection through Contour Formation using Background Subtraction”, *Procedia Computer Science*, t. 171, s. 1979–1988, sty. 2020. DOI: 10.1016/j.procs.2020.04.212.
- [122] Petrou, M. i Petrou, C., „Image Processing”, *John Wiley and Sons*, s. 527–668, 2010.
- [123] hr, M. i K, S., „Morphological Operations and Projection Profiles based Segmentation of Handwritten Kannada Document”, *International Journal of Applied Information Systems*, t. 4, s. 13–19, paź. 2012. DOI: 10.5120/ijais12-450704.
- [124] Yu, Y. i in., „Techniques and Challenges of Image Segmentation: A Review”, *Electronics*, t. 12, nr. 5, 2023. DOI: 10.3390/electronics12051199.
- [125] Prabu, S. i Gnanasekar, J., „A Study on Image Segmentation Method for Image Processing”, w grud. 2021. DOI: 10.3233/APC210223.
- [126] Shapiro, L. G. i Stockman, G. C., „Computer Vision”, *Prentice-Hall*, s. 305–351, 2001.
- [127] Kang, N., Yi-quan, W. i Bin, H., „Segmentation of metallographic images based on improved CV model”, *Chinese Journal of Engineering*, t. 39, nr. 12, s. 1866–1873, 2017. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2017.12.013.
- [128] Aly, A. A., Deris, S. B. i Zaki3, N., „Research review for digital image segmentation techniques”, *International Journal of Computer Science Information Technology (IJCSIT)*, t. 3, nr. 5, 2011. DOI: 10.5121/ijcsit.2011.3509.99.

- [129] Shrivakshan, G. i Chandrasekar, C., „A Comparison of various Edge Detection Techniques used in Image Processing”, *International Journal of Computer Science Issues*, t. 9, s. 269–276, wrz. 2012. adr.: https://www.researchgate.net/publication/303142762_A_Comparison_of_various_Edge_Detection_Techniques_used_in_Image_Processing.
- [130] Samko, M., „Detekcja krawędzi w cyfrowych obrazach monochromatycznych - przegląd rozwiązań”, *Studia Informatica*, t. 30, nr. 3A, s. 59–84, 2009. adr.: https://delibra.bg.polsl.pl/Content/74546/BCPS-83726_2009_Detekcja-krawedzi-.pdf.
- [131] Kowalski, P. i Czyżak, M., „Algorytmy Wykrywania Krawędzi W Obrazie”, *Electrical Engineering*, nr. 96, 2018. DOI: 10.21008/j.1897-0737.2018.96.0021.
- [132] Mushtaq, F. i Bedi, H., *A Review Based on the Comparison between Canny Edge Detection and Sobel Algorithm*, Materiały pokonferencyjne - Kilby 100: 7th International joint conference on computing sciences, maj 2023. DOI: 10.2139/ssrn.4485325.
- [133] Akbari Sekehravani, E., Babulak, E. i Masoodi, M., „Implementing canny edge detection algorithm for noisy image”, *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, t. 9, s. 1404–1410, sierp. 2020. DOI: 10.11591/eei.v9i4.1837.
- [134] Damu, S. i Deepa, P., „FPGA implementation of cost-effective robust Canny edge detection algorithm”, *Journal of Real-Time Image Processing*, t. 16, sierp. 2019. DOI: 10.1007/s11554-016-0582-2.
- [135] Salau, A. O. i Jain, S., „Feature Extraction: A Survey of the Types, Techniques, Applications”, s. 158–164, 2019. DOI: 10.1109/ICSC45622.2019.8938371.
- [136] Venkataraman, D. i Mangayarkarasi, N., „Computer vision based feature extraction of leaves for identification of medicinal values of plants”, s. 1–5, 2016, Materiały pokonferencyjne - 2016 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICIC). DOI: 10.1109/ICCIC.2016.7919637.
- [137] Dongping, T., „A review on image feature extraction and representation techniques”, *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*, t. 8, nr. 4, s. 385–396, sty. 2013.
- [138] Zeng, L., „The Development of Image Classification Models Based on Computer Vision”, *Highlights in Science, Engineering and Technology*, t. 34, s. 430–434, lut. 2023. DOI: 10.54097/hset.v34i.5505.
- [139] Olaoye, F., Potter, K. i Doris, L., „Computer Vision and Image Recognition Techniques”, *Journal of Scientific Conference Proceedings*, mar. 2024. adr.: https://www.researchgate.net/publication/379035447_Computer_Vision_and_Image_Recognition_Techniques.
- [140] Kaur, P., Singh, S. K., Singh, I. i Kumar, S., „Exploring convolutional neural network in computer vision-based image classification”, 2021, Materiały pokonferencyjne - International conference on smart systems and advanced computing (Syscom-2021). adr.: <https://ceur-ws.org/Vol-3080/21.pdf>.

- [141] Yoo, H.-J., „Deep convolution neural networks in computer vision: a review”, *IEIE Transactions on Smart Processing and Computing*, t. 4, nr. 1, s. 35–43, 2015. DOI: 10.5573/IEIESPC.2015.4.1.035.
- [142] Iffat, Z., Giounona, T., Richard, B., Patel, N. i Araujo, L., „Hands-On Convolutional Neural Networks with TensorFlow: Solve computer vision problems with modeling in TensorFlow and Python”, *Packt Publishing Ltd*, sierp. 2018.
- [143] Abadi, M., „TensorFlow: learning functions at scale”, 9, Materiały pokonferencyjne - 21st ACM SIGPLAN International Conference on Functional Programming, t. 51, wrz. 2016. DOI: 10.1145/2951913.2976746.
- [144] Goldsborough, P., *A Tour of TensorFlow*, 2016. DOI: 10.48550/arXiv.1610.01178. arXiv: 1610.01178 [cs.LG].
- [145] Mahamkali, N. i Ayyasamy, V., „OpenCV for Computer Vision Applications”, Materiały pokonferencyjne - National Conference on Big Data and Cloud Computing (NCBDC'15), mar. 2015. adr.: https://www.researchgate.net/publication/301590571_OpenCV_for_Computer_Vision_Applications.
- [146] Culjak, I., Abram, D., Pribanic, T., Dzapo, H. i Cifrek, M., „A brief introduction to OpenCV”, s. 1725–1730, 2012, Materiały pokonferencyjne - 2012 Proceedings of the 35th International Convention MIPRO. adr.: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:7678499>.
- [147] Kabala, T. i Weremczuk, J., „Smart Wireless Transducer Dedicated for Use in Aviation Laboratories”, *Sensors*, t. 24, nr. 11, 2024. DOI: 10.3390/s24113585.
- [148] Kabala, T. i Weremczuk, J., „Rotary Telemetry System for Temperature Measurements in Aircraft Component Testing”, *International Journal of Electronics and Telecommunications*, s. 556–564, kw. 2022. DOI: 10.24425/ijet.2022.141274.
- [149] Kabala, T. i Weremczuk, J., „Computer Vision Based Leakage Detection System Dedicated for Use in Aviation Component Test Laboratories”, *Przegląd Elektrotechniczny*, t. 99, wrz. 2023. DOI: 10.15199/48.2023.09.07. adr.: <http://pe.org.pl/articles/2023/9/7.pdf>.

Spis rysunków

1.1	Przykładowe stanowiska testowe	9
1.2	Struktura stanowiska do testów obrotowych w Instytucie Lotnictwa	10
1.3	Przykładowe wycieki na stanowisku badawczym	11
1.4	Efekt rozbudowy stanowiska badawczego na potrzeby jednego z testów	12
1.5	Czujniki typowe dla instrumentacji lotniczych stanowisk badawczych	13
1.6	Koncepcja wdrożenia inteligentnych rozwiązań pomiarowych i wykonawczych	16
2.1	Przetworniki, które mogą zostać zaklasyfikowane jako inteligentne	19
2.2	Moduły telemetryczne o niskiej liczbie kanałów pomiarowych	19
2.3	Moduły telemetryczne firmy KMT użyte w testach obrotowych	20
2.4	Moduły telemetryczne w testach obrotowych	21
2.5	System telemetryczny do pomiarów wykonywanych podczas lotu	22
2.6	Przykładowe ustawniki pozycyjne	25
2.7	Metody wykrywania wycieków	27
2.8	Akustyczny system detekcji wycieków	28
2.9	System detekcji wycieków z wykorzystaniem światłowodu	28
2.10	Wykrywanie wycieku z wykorzystaniem dodatkowej linii	29
2.11	Wykrywanie wycieku w wybranym punkcie	29
2.12	Systemy detekcji wycieków bazujące na widzeniu komputerowym	30
3.1	Struktura inteligentnego przetwornika	33
3.2	Popularne moduły komunikacyjne zintegrowane z mikrokontrolerem.	34
3.3	Popularne komputery jednopłytkowe	35
3.4	Podstawowe topologie sieci bezprzewodowych	36
3.5	Zestawienie rodzajów i standardów komunikacji bezprzewodowej	37
3.6	Kanały częstotliwości używane podczas komunikacji w standardzie BLE	38
3.7	Komunikacja w standardzie BLE	39
3.8	Podział metod zasilania czujników	40
3.9	Metody bezprzewodowego transferu energii	41
3.10	Przesyłanie energii poprzez indukcję elektromagnetyczną	43
3.11	Układ wykorzystujący magnetyczne sprzężenie rezonansowe	44
3.12	Struktura układu zasilania poprzez fale elektromagnetyczne	45
3.13	Układy obsługiwane poprzez protokół SPI	47
3.14	Etapy przetwarzania i analizy obrazu	49
3.15	Efekt odejmowania tła z progowaniem	50

3.16	Wyszczególnienie obiektu z wykorzystaniem filtra górnoprzepustowego	51
3.17	Efekt przeprowadzenia operacji erozji	51
3.18	Detekcja brzegów z wykorzystaniem pochodnych	52
3.19	Kolejne kroki przetwarzania obrazu metodą Canny'ego	55
4.1	Koncepcja wdrożenia układów pomiarowych na stanowisku badawczym	57
4.2	Struktura bezprzewodowego systemu pomiarowego o zasilaniu radiowo-bateryjnym	59
4.3	Moduły rozwojowe wykorzystane podczas wstępnych badań	60
4.4	Bazowy moduł przetwornika odpowiadający za pomiary i komunikację	61
4.5	Moduł odpowiadający za zasilanie bezprzewodowe	61
4.6	Przetwornik z zainstalowanym modułem zasilającym (przed zlutowaniem)	62
4.7	Schemat przedstawiający sposób działania programu przetwornika	64
4.8	Sposób obsługi termopar z kompensacją temperaturą przy pomocy czujnika RTD	66
4.9	Sposób podłączenia termopary	67
4.10	Sposób podłączenia czujnika RTD	68
4.11	Podłączenie tensometru w układzie ćwierćmostka.	68
4.12	Podłączenie tensometru w układzie pełnego mostka	69
4.13	Tensometr w układzie pełnego mostka (napięcie zasilania jako referencja)	69
4.14	Przykładowe czujniki z wyjściem tensometrycznym	70
4.15	Współpraca układu z zewnętrznymi bateriami	71
4.16	Stanowisko testowe przygotowane do badania obsługi czujników temperatury	72
4.17	Wyniki testu obsługi termopary z kompensacją poprzez czujnik PT1000	73
4.18	Testy obsługi czujników wykorzystujących mostki tensometryczne	73
4.19	Test obsługi czujnika ciśnienia z wyjściem napięciowym	74
4.20	Stanowisko do testów zużycia energii	75
4.21	Zużycie energii podczas obsługi rezystancyjnego czujnika PT1000	75
4.22	Przebieg prądu czujnika zarejestrowany dla częstotliwości 2 Hz	76
4.23	Stanowisko przygotowane do badania zasilania bezprzewodowego	77
4.24	Badania przetworników w pomieszczeniu prowadzenia testów	79
4.25	Wskaźniki RSSI odpowiadające przetwornikom w pomieszczeniu testowym	79
4.26	Wspornik obrotowy, na którym zostanie zainstalowany przetwornik	82
4.27	Zastąpienie złącza obrotowego zaprojektowanym modułem telemetrycznym	82
4.28	Sposób wykorzystania przetwornika obrotowego na stanowisku testowym	83
4.29	Układ do wstępnych testów komunikacji radiowej przy obracającym się module BLE	83
4.30	Struktura systemu telemetry obrotowej	84
4.31	Schemat strony nadawczej i odbiorczej układu przekazywania energii	85
4.32	Pierwszy prototyp przetwornika wysokoobrotowego zasilany radiowo	86
4.33	Struktura zaprojektowanego modułu telemetrycznego – prototyp II	87
4.34	Moduły zasilające i moduł telemetryczny - prototyp II	87

4.35	Struktura zaprojektowanego modułu telemetrycznego – prototyp III	88
4.36	Czterowarstwowa cewka odbiorcza - prototyp III	88
4.37	Pomiar indukcyjności cewek	89
4.38	Główna płytką PCB z zainstalowanymi komponentami - prototyp III	89
4.39	Sposób podłączenia termopar i rezystancyjnych czujników temperatury	90
4.40	Zmontowany moduł telemetryczny - prototyp III	90
4.41	Sterowanie przetwornikami ADC (pogrubione linie CSB)	91
4.42	Ramka danych przesyłanych poprzez BLE	91
4.43	Badanie poboru prądu przetwornika obrotowego	92
4.44	Stanowiska do badania zasilania bezprzewodowego	93
4.45	Prądy dostępne po stronie odbiorczej przy stabilizowanym napięciu 3,3 V . . .	93
4.46	Stacjonarne badania modułu telemetrycznego	94
4.47	Przygotowane stanowisko testowe - zainstalowany prototyp II (widok 1/2) . .	95
4.48	Przygotowane stanowisko testowe - zainstalowany prototyp II (widok 2/2) . .	96
4.49	Efekt wyważania na prędkości 5000 obr./min - Prototyp III	96
4.50	Skokowa zmiana temperatury na prędkości 20000 obr./min - Prototyp III . . .	97
4.51	Montaż modułu telemetrycznego i cewki zasilającej - Prototyp III	98
4.52	Ustawniki pozycyjne typu HH500 stosowane w Laboratorium Badania Łożysk .	101
4.53	Zaproponowana struktura sterownika ustawnika pozycyjnego	102
4.54	Zaprojektowany sterownik ustawnika pozycyjnego	103
4.55	Moduł kontrolno-komunikacyjny	104
4.56	Opis wyprowadzeń modułu kontrolno-komunikacyjnego	104
4.57	Sposób obsługi modułu sterownika silnika z układem DRV8874	105
4.58	Zaprojektowany sterownik zainstalowany na ustawniku pozycyjnym	106
4.59	Sposób kontroli napięcia podawanego na silnik podczas sterowania	107
4.60	Przykładowy planowany przebieg regulacji dla trzech stref prędkości ruchu . .	107
4.61	Schemat zaproponowanego układu regulacji (np. położenia, przepływu)	108
4.62	Schemat przedstawiający zasadę działania programu sterownika ustawnika . .	109
4.63	Stanowisko przygotowane do testów regulacji	110
4.64	Zmiany przepływu dla kroku T_{czas} równego 25 ms	112
4.65	Przebieg zarejestrowany podczas automatycznej regulacji położenia w zakresie 1-10%	113
4.66	Przebiegi zarejestrowane podczas zmiany wart. zadanej z 1 do 5 l/min	115
4.67	Zmiany przepływu przy skróconym teście	116
4.68	Przebieg prądu silnika na skraju przełączenia zakresów prędkości regulacji . .	117
4.69	Raspbery Pi z kamerą wykorzystywaną w badaniach	120
4.70	Przebieg operacji graficznych	121
4.71	Maskowanie ruchomych elementów na stanowisku testowym	122
4.72	Algorytm detekcji wycieków na podstawie wykrywania konturów zmian	123
4.73	Symulacja wycieku oleju i glikolu	124
4.74	Przypadkowy wyciek oleju pod zbiornikiem podczas prowadzenia testów	124
4.75	Monitorowanie wybranych obszarów	125

4.76 Wykrycie przekroczenia ustalonego poziomu oleju (czerwony kwadrat)	126
4.77 Stanowisko przygotowane na potrzeby testu detekcji kropeł	126
4.78 Rejestracja spadających kropeł oleju podczas wstępnych testów	127
4.79 Obraz detekcji kropeł na oscyloskopie przy częstotliwości około 3 Hz (wyjście GPIO)	127
4.80 Zbiorniki w końcowej części instalacji służącej do pomiaru wycieku oleju	128
4.81 Kolejne wiersze danych odczytane w programie terminalowym	131
4.82 Sposób przesyłania danych pomiędzy komputerem a przetwornikami	132
4.83 Interfejs przygotowanego programu pomiarowego	133

Spis tabel

2.1	Porównanie wybranych modułów telemetrycznych o małych rozmiarach	20
2.2	Porównanie wybranych modułów do testów obrotowych	21
2.3	Porównanie wybranych ustawników z napędami elektrycznymi	25
3.1	Porównanie parametrów modułu Proteus III (nRF52840) i Raspberry Pi 4B . .	35
3.2	Porównanie wybranych protokołów komunikacji bezprzewodowej	37
3.3	Porównanie wybranych typów przetworników analogowo-cyfrowych	48
4.1	Pobór prądu, który odpowiadałby zasilaniu stałym napięciem i pracy ciągłej . .	70
4.2	Pobór prądu i szacowany czas pracy przetwornika zasilanego baterią CR2032 .	76
4.3	Pobór prądu i szacowany czas pracy przy zasilaniu czujnika przez dwie baterie 6LR61	77
4.4	Wyniki testu radiowego zasilania bezprzewodowego	78
4.5	Ustawienia dobrane podczas testu regulacji położenia grzybka zaworu	113
4.6	Ustawienia dobrane podczas testu regulacji przepływu	114
4.7	Ustawienia dobrane podczas testu regulacji przepływu	116
4.8	Zużycie energii i szacowany czas pracy podczas reg. przepływu z pomiarem pozycji	117

Spis załączników

1	Załącznik do umowy o prowadzeniu doktoratu wdrożeniowego	156
2	Uniwersalny przetwornik pomiarowy - schemat	157
3	Uniwersalny przetwornik pomiarowy - projekt PCB	158
4	Moduł zasilania radiowego - schemat	159
5	Moduł zasilania radiowego - projekt PCB	160
6	Obrotowy przetwornik temperatury - schemat	161
7	Obrotowy przetwornik temperatury - projekt PCB	162
8	Obrotowy przetwornik temperatury - PCB widoki 3D	163
9	Sterownik ustawnika - schemat modułu bazowego	164
10	Sterownik ustawnika - projekt PCB modułu bazowego	165
11	Sterownik ustawnika - schemat modułu kontrolnego	166
12	Sterownik ustawnika - projekt PCB modułu kontrolnego	167

Załącznik 1

Załącznik do umowy o prowadzeniu doktoratu wdrożeniowego

Załącznik nr 1 do umowy
w zakresie prowadzenia doktoratu wdrożeniowego

OPIS PROBLEMU BADAWCZEGO,

który będzie rozwiązywany przez doktoranta w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy” w ramach pracy projektowej, konstrukcyjnej, technologicznej lub wdrożeniowej, której tematyka będzie wykazywała związek z działalnością Partnera i którym jest zainteresowany Partner

Tematem podejmowanej pracy doktorskiej jest opracowanie inteligentnych czujników i układów pomiarowych dedykowanych Internetowi Rzeczy w laboratoriach testów komponentów lotniczych. Wprowadzenie innowacyjnych rozwiązań w zakresie inteligentnych urządzeń pomiarowych stosowanych podczas testów komponentów lotniczych, ze szczególnym uwzględnieniem pracy w sieci IoT (Internet of Things) i rozwiązań bezprzewodowych, pozwoli na znaczne poszerzenie wiedzy dotyczącej metod testowania komponentów, usprawni proces wykonywania testów oraz stworzy nowe możliwości testowe w obszarach do tej pory niedostępnych. Celem pracy jest przeprowadzenie dogłębnej analizy powyżej przedstawionej tematyki i zaproponowanie innowacyjnych rozwiązań w tym zakresie. W inteligentnych rozwiązaniach IoT widziana jest przyszłość rozwoju wielu dziedzin gospodarki o czym świadczy m.in. to, że są one przedmiotem badań jednostek naukowych, a duże koncerny otwierają swoje laboratoria ukierunkowane na tę tematykę. Specyfika testów komponentów lotniczych stwarza potrzebę odrębnego rozpatrzenia tematyki inteligentnych czujników i układów pomiarowych tak, aby jak najlepiej wykorzystać potencjał jaki one oferują. Spojrzenie na instrumentację stanowisk testowych jako na sieć czujników, mogących wykonywać złożone operacje i komunikujących się ze sobą oraz z głównym systemem akwizycji danych, otwiera nowe możliwości badawcze i pozwoli na zaproponowanie unikalnych w skali światowej rozwiązań. Dogłębna analiza problemu badawczego pozwoli na zmianę podejścia do sposobu przygotowywania i przeprowadzania testów komponentów lotniczych oraz upowszechnienie inteligentnych rozwiązań bezprzewodowych w laboratoriach badawczych. Temat pomiarów jest szczególnie istotny podczas testów komponentów lotniczych ze względu na to, że od wiarygodności wyników zależy bezpieczeństwo pasażerów samolotów oraz decyzje odnośnie zmian w konstrukcji testowanych komponentów. W ramach badań zostaną wytypowane właściwości, jakie muszą spełniać czujniki i układy pomiarowe, aby mogły w jak największym stopniu realizować wymagania testów komponentów lotniczych. Zostaną przeanalizowane dostępne protokoły transmisji bezprzewodowej, komponenty elektroniczne, sposoby zasilania, techniki montażu, metody pomiaru oraz sposoby autodiagnostyki czujników i diagnostyki testowanych komponentów. Informacje te posłużą do skonstruowania inteligentnych czujników oraz obrotowych i stacjonarnych inteligentnych „adapterów IoT”, pozwalających na przetwarzanie i transmitowanie sygnałów z czujników takich jak termopary, tensometry, czujniki ciśnienia.

PROREKTOR
Politechniki Warszawskiej

prof. dr hab. inż. Mariusz Małkowski
Jednostka

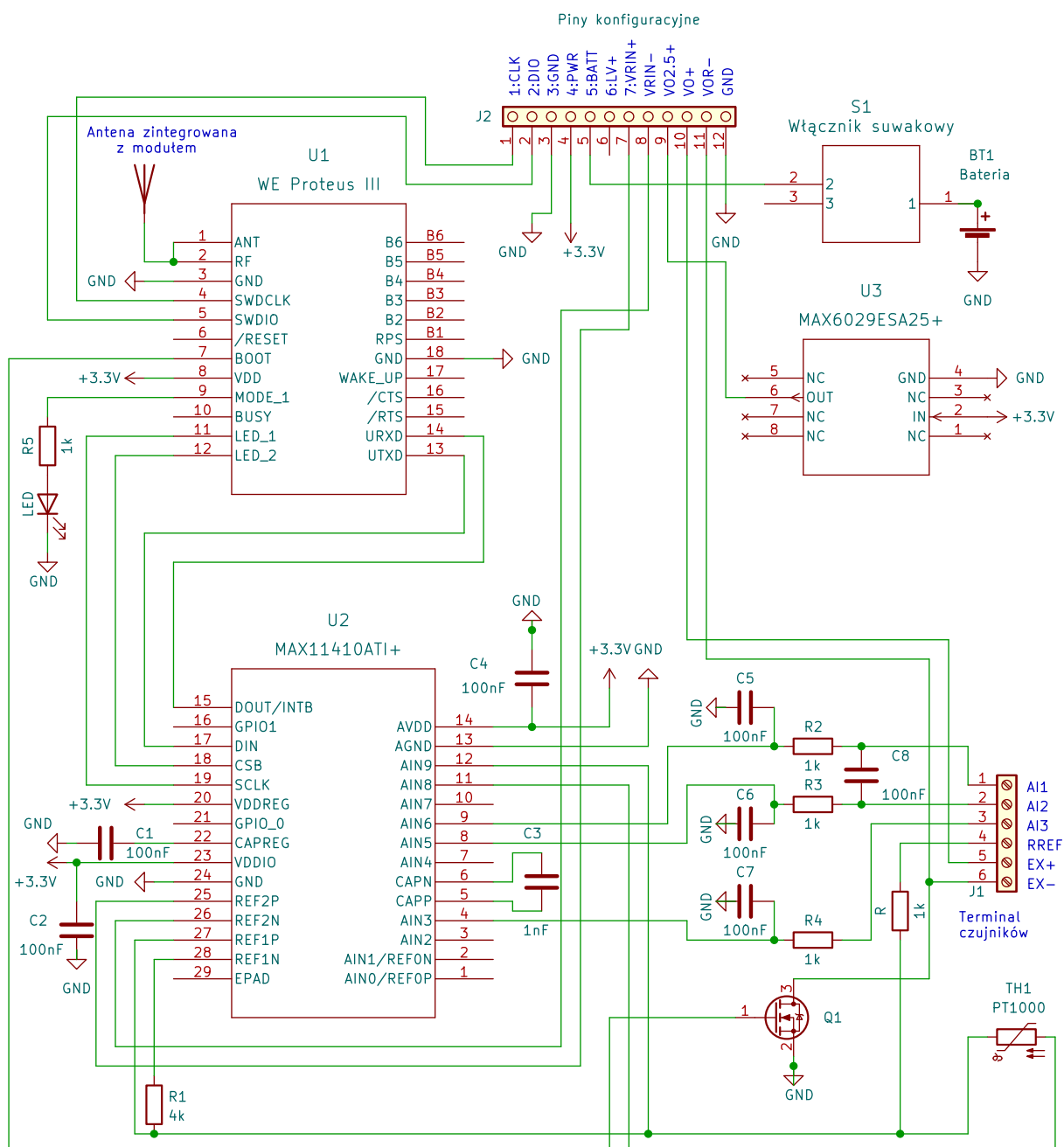
DYREKTOR
Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Lotnictwa

dr inż. Paweł Stęszewski
Partner


Doktorant

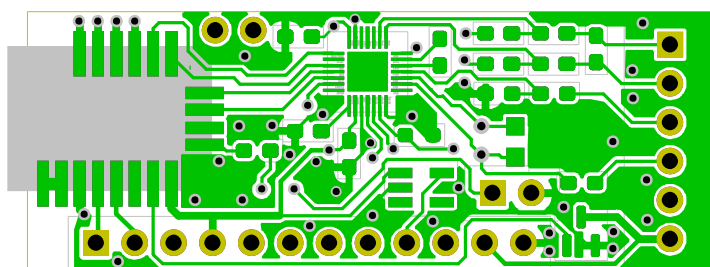
Załącznik 2

Uniwersalny przetwornik pomiarowy - schemat

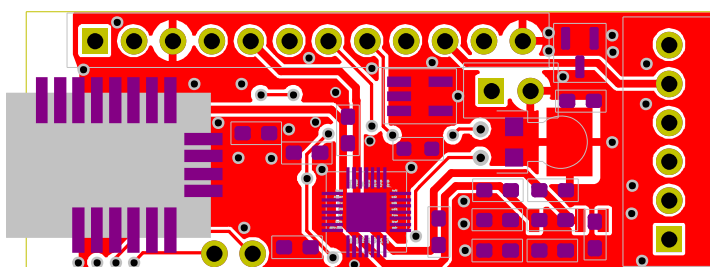


Załącznik 3

Uniwersalny przetwornik pomiarowy - projekt PCB



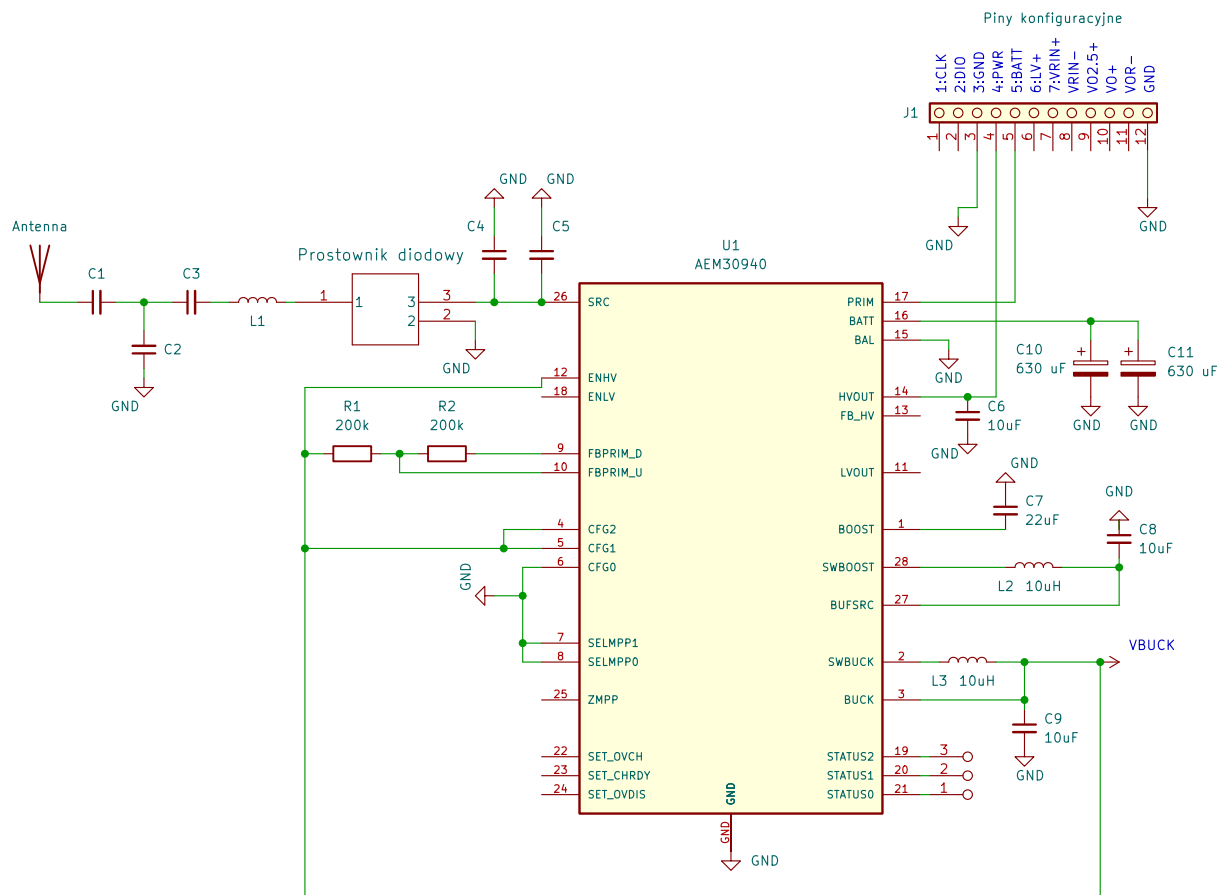
Wartswa górna



Wartswa dolna
(Wymiary 17x45 mm, skala 2:1)

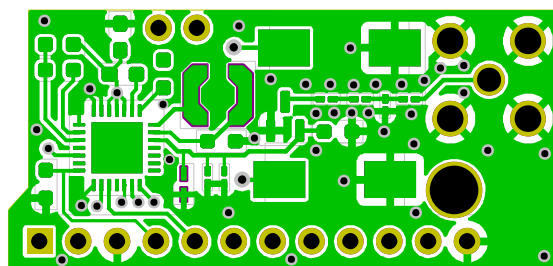
Załącznik 4

Moduł zasilania radiowego - schemat

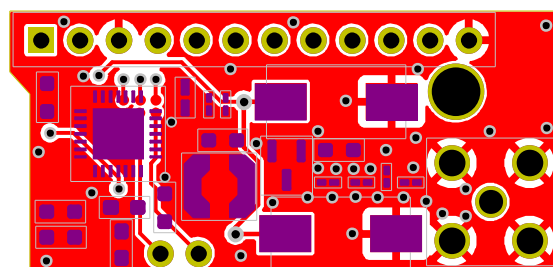


Załącznik 5

Moduł zasilania radiowego - projekt PCB



Wartswa górna

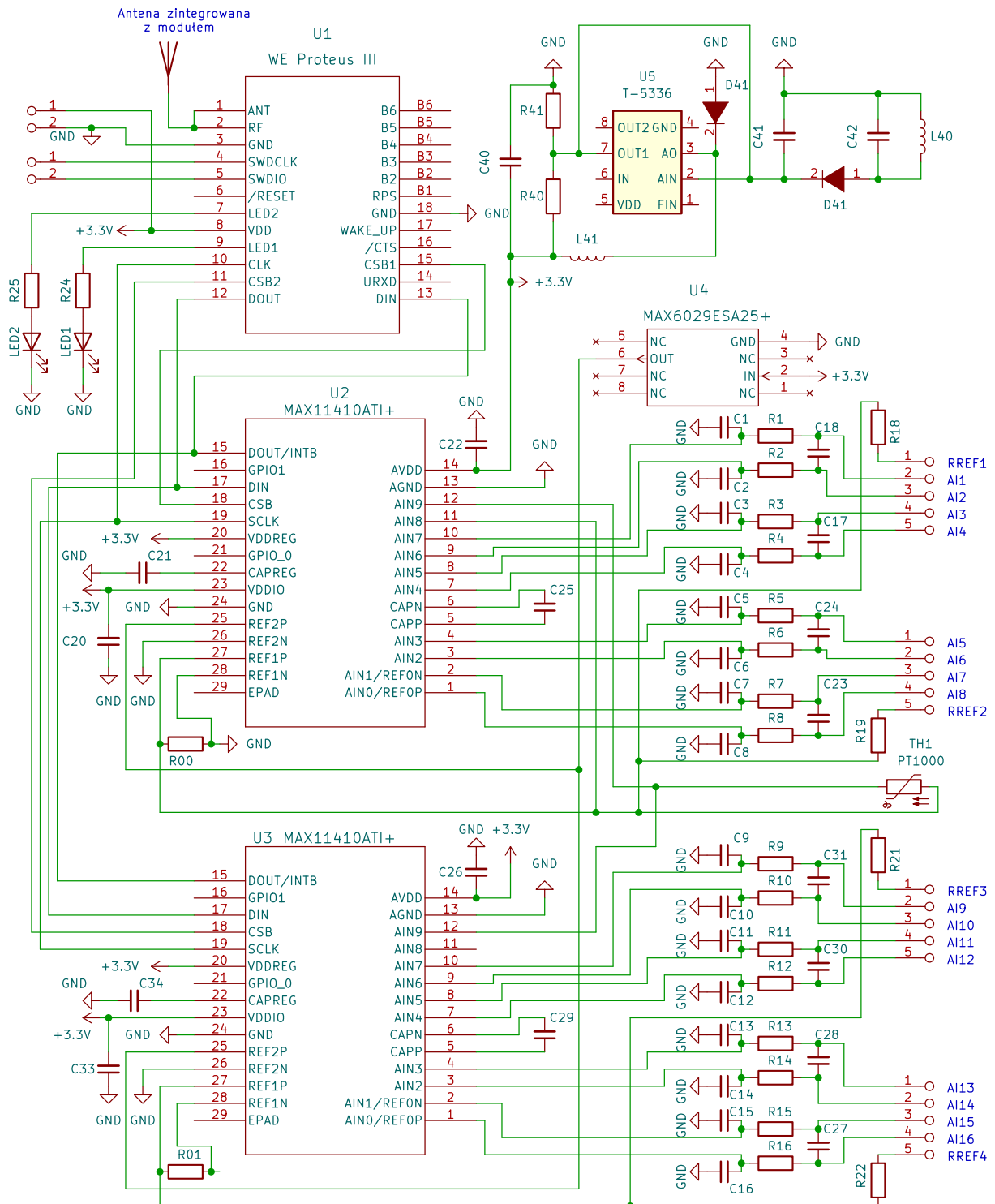


Wartswa dolna

(Wymiary 17x36 mm, skala 2:1)

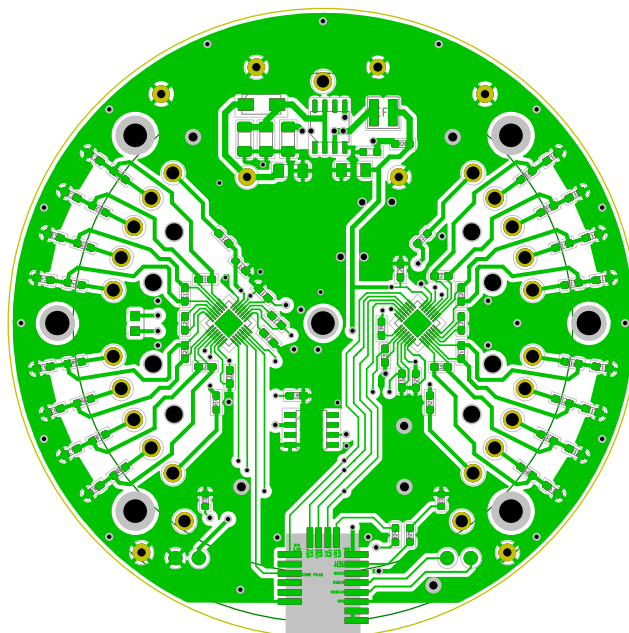
Załącznik 6

Obrotowy przetwornik temperatury - schemat

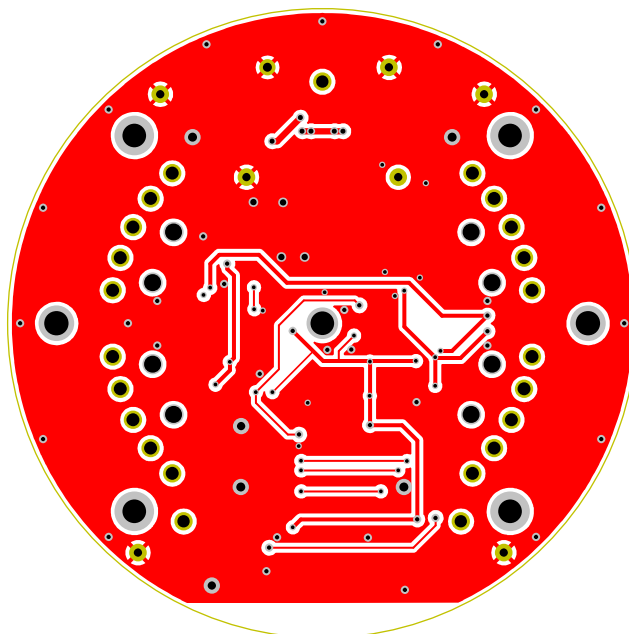


Załącznik 7

Obrotowy przetwornik temperatury - projekt PCB



Wartswa górna



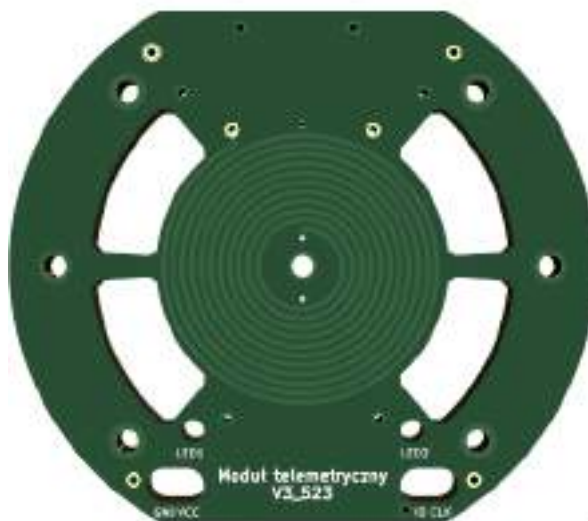
Wartswa dolna
(średnica 80mm, skala 1:1)

Załącznik 8

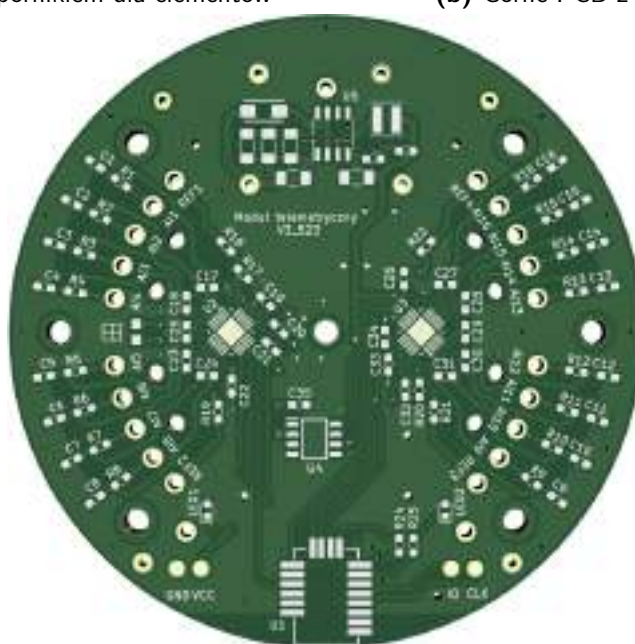
Obrotowy przetwornik temperatury - PCB widoki 3D



(a) PCB będące wspornikiem dla elementów



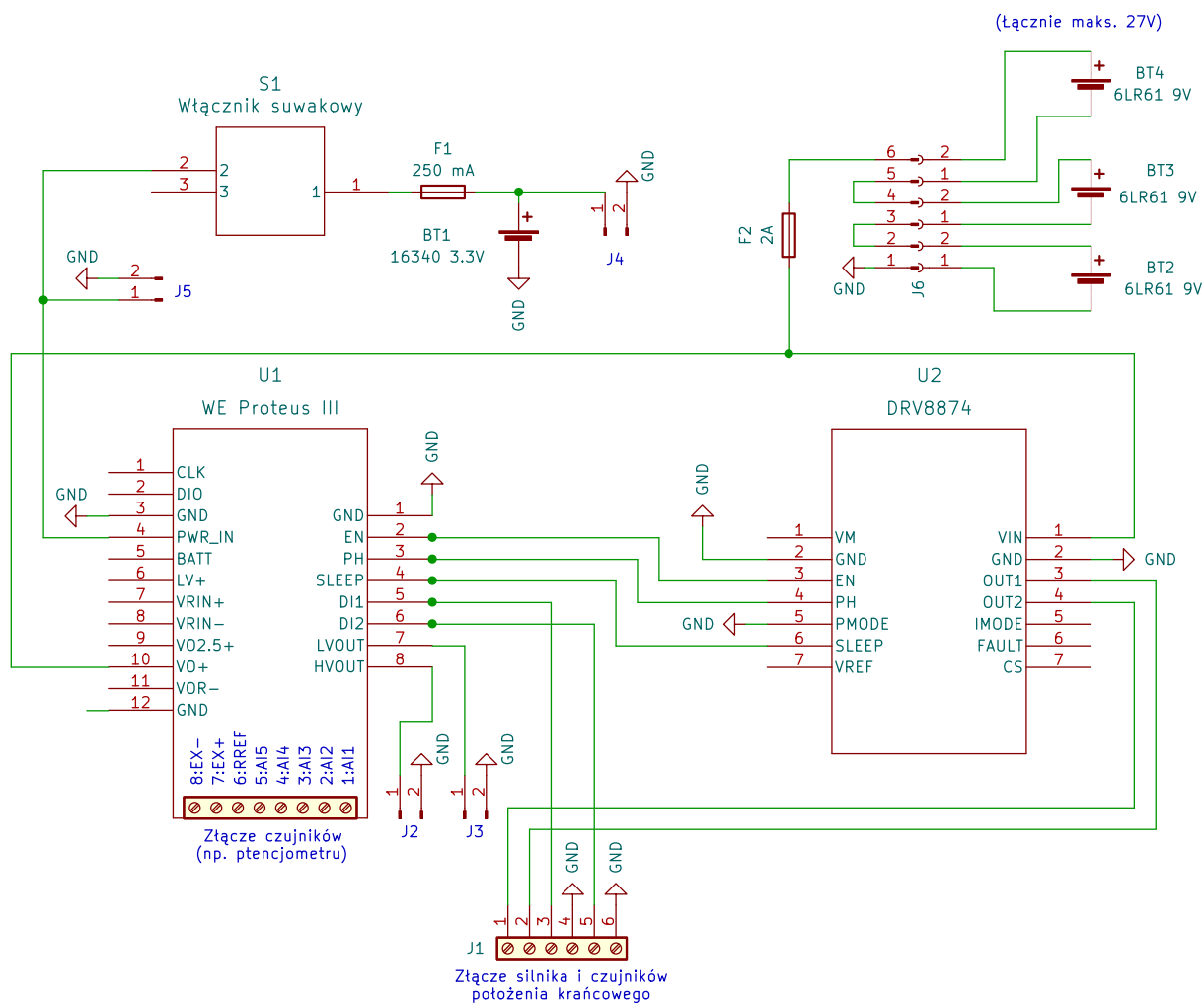
(b) Górne PCB z cewką zasilającą



(c) Główne PCB (skala 1:1)

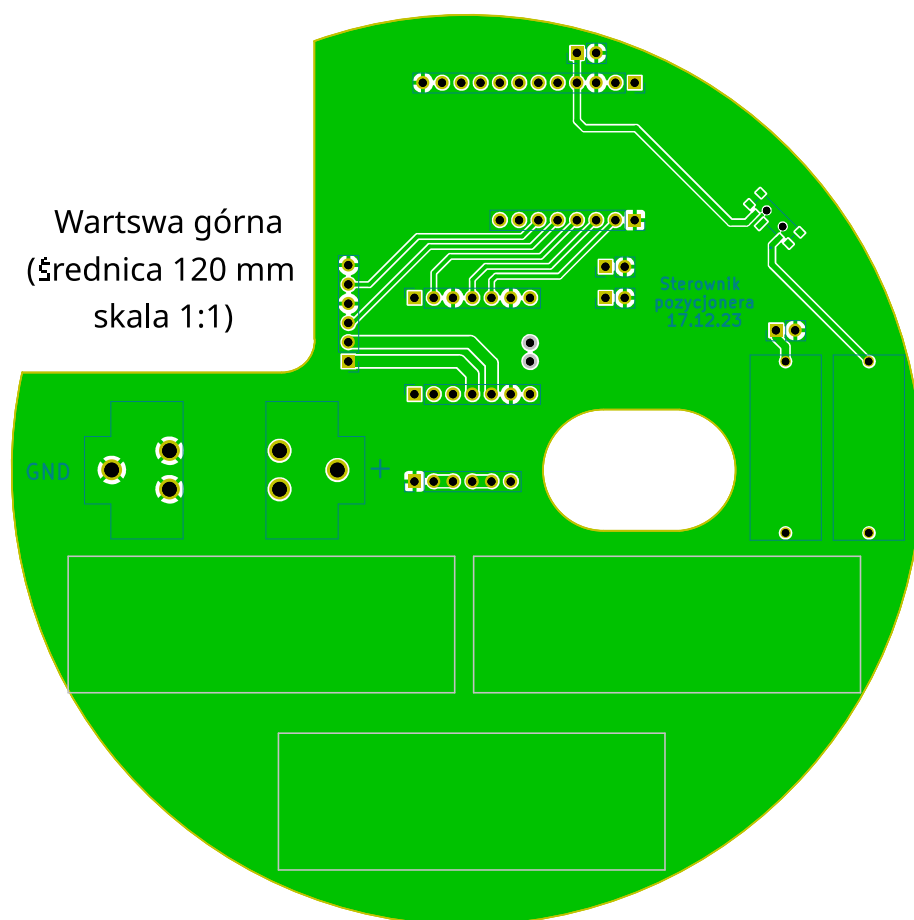
Załącznik 9

Sterownik ustawnika - schemat modułu bazowego



Załącznik 10

Sterownik ustawnika - projekt PCB modułu bazowego

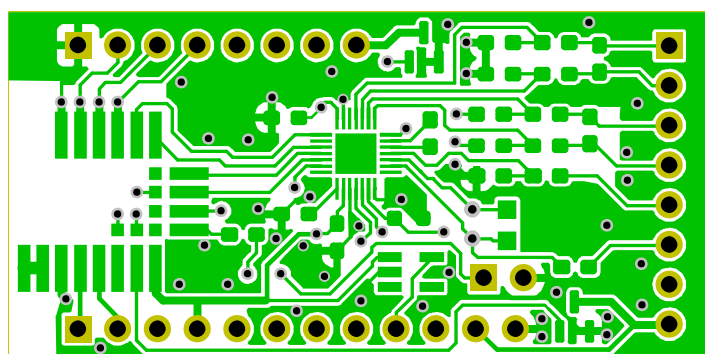


Sterownik ustawnika - schemat modułu kontrolnego

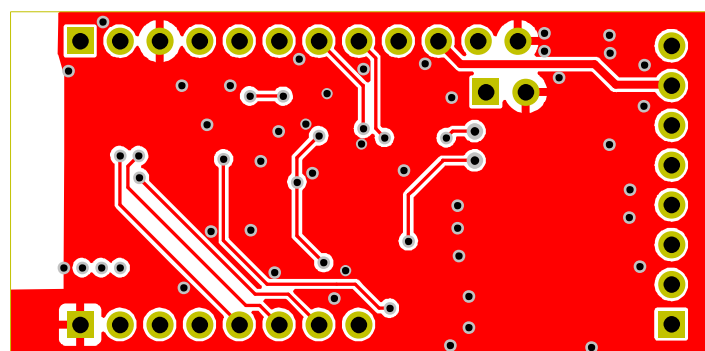


Załącznik 12

Sterownik ustawnika - projekt PCB modułu kontrolnego



Wartswa górna



Wartswa dolna
(Wymiary 22x45 mm, skala 2:1)