

**WYDZIAŁ
ELEKTROTECHNIKI
I INFORMATYKI
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ**

Karol Bulanowski

Tekstroniczny identyfikator RFID z czujnikiem
pojemnościowym

Praca dyplomowa magisterska

Opiekun pracy:
dr hab. inż. Mariusz Węglarski, prof. PRz

Rzeszów, 2025

Spis treści

1. WSTĘP	5
1.1. Wprowadzenie	5
1.2. Cel i zakres pracy.....	5
2. CZĘŚĆ TEORETYCZNA	7
2.1. Technika RFID	7
2.1.1. Zasada działania systemów RFID	7
2.1.2. Pasmo HF i technologia NFC.....	9
2.1.3. Standardy ISO i protokoły komunikacyjne	10
2.1.4. Budowa identyfikatora RFID	11
2.1.5. Anteny RFID.....	12
2.1.6. Czytniki i interfejsy mobilne.....	13
2.2. Tekstronika i układy zintegrowane z materiałami	14
2.2.1. Wprowadzenie do tektroniki i smart textiles	15
2.2.2. Przewodzące przędze i materiały dielektryczne	15
2.2.3. Przykłady integracji elektroniki z odzieżą	17
2.2.4. Wyzwania rozwoju tektroniki.....	18
2.3. RFID na podłożach elastycznych i tekstylnych	19
2.3.1. Przegląd rozwiązań elastycznych identyfikatorów RFID.....	19
2.3.2. Tekstroniczne anteny i znaczniki – projektowanie i haft	22
2.3.3. Komunikacja z czytnikiem w kontekście tekstyliów.....	25
2.4. Czujniki pojemnościowe w elektronice ubieralnej	26
2.4.1. Zasada działania i parametry czujników pojemnościowych.....	26
2.4.2. Przegląd technologii czujników pojemnościowych.....	27
2.4.3. Integracja z tekstyliami – haft, materiały, przetworniki	30
2.4.4. Przegląd rozwiązań tekstylnych czujników pojemnościowych.....	32
2.5. Podsumowanie	35
3. CZĘŚĆ PRAKTYCZNA.....	36
3.1. Projektowanie układu.....	37
3.1.1. Część sprzętowa.....	37
3.1.2. Część programowa	44
3.2. Projektowanie anteny	64
3.3. Projektowanie czujnika pojemnościowego	68
3.4. Podsumowanie i wnioski	72
4. POMIARY.....	74
4.1. Wprowadzenie	74
4.2. Wykonanie pomiarów	74
4.3. Wnioski	77
5. PODSUMOWANIE.....	78
LITERATURA	80

1. Wstęp

1.1. Wprowadzenie

Współczesny rozwój technologii elektronicznych coraz wyraźniej zmierza w kierunku integracji funkcjonalnych układów z otoczeniem człowieka oraz przedmiotami codziennego użytku. Jednym z istotnych obszarów tego trendu jest tektronika – interdyscyplinarna dziedzina łącząca elektronikę, informatykę i inżynierię materiałową z technologią włókienniczą. Jej celem jest tworzenie rozwiązań, które umożliwiają implementację czujników, układów przetwarzania danych oraz systemów komunikacyjnych bezpośrednio w strukturach tekstylnych. Tego rodzaju podejście otwiera nowe perspektywy w zakresie monitorowania parametrów fizjologicznych, sterowania otoczeniem, diagnostyki zdrowotnej, a także identyfikacji i śledzenia obiektów. Równolegle z rozwojem tektroniki następuje intensyfikacja badań nad nowymi zastosowaniami technice RFID (ang. *Radio Frequency Identification*). Systemy RFID, wykorzystujące komunikację radiową do automatycznej identyfikacji i gromadzenia danych, znalazły szerokie zastosowanie w logistyce, handlu, medycynie i przemyśle. Dzięki miniaturyzacji układów scalonych oraz standaryzacji interfejsów bezprzewodowych – w tym technologii NFC (ang. *Near Field Communication*) – możliwa stała się integracja funkcjonalności RFID z elementami odzieży i tekstyliów technicznych.

1.2. Cel i zakres pracy

Celem niniejszej pracy było zaprojektowanie oraz realizacja możliwie najprostszego i najmniejszego tekstylnego identyfikatora RFID zintegrowanego z czujnikiem pojemnościowym, stanowiącego połączenie nowoczesnych technologii identyfikacyjnych z możliwościami, jakie oferuje tektronika. W projekcie wykorzystano przewodzące nici haftowane na podłożu tekstylnym do wykonania zarówno anteny RFID, jak i struktur czujnikowych, umożliwiających rejestrację zmian pojemności związanych z oddziaływaniem otoczenia, takich jak nacisk, obecność obiektu czy wilgotność.

System oparto na pasywnym układzie RFID działającym w paśmie HF (13,56 MHz), zgodnym z technologią NFC, co pozwala na bezpośrednią komunikację z urządzeniami mobilnymi, takimi jak smartfony. Zastosowany układ pomiarowy (RF430FRL152H) wyposażony w przetwornik ADC umożliwia monitorowanie napięcia odpowiadającego zmianom pojemności, co otwiera możliwości realizacji prostych funkcji sensorycznych bez konieczności stosowania zewnętrznego zasilania.

W ramach prac projektowych opracowano geometrię haftowanej anteny, dobrano i przetestowano różne struktury czujników pojemnościowych (m.in. grzebieniowe i spiralne), zintegrowano komponenty elektroniczne z podłożem tekstylnym oraz wykonano dedykowaną płytke drukowaną z układem RFID. Przeprowadzono również testy laboratoryjne, w których oceniano podstawowe parametry elektryczne układu oraz efektywność komunikacji bezprzewodowej.

W części badawczej skupiono się na analizie wpływu konstrukcji geometrycznej czujników na charakterystykę odpowiedzi napięciowej.

2. Część teoretyczna

Celem niniejszego rozdziału jest przedstawienie zagadnień teoretycznych związanych z techniką RFID, komunikacją w paśmie HF (ang. *High Frequency*), czujnikami pojemnościowymi oraz zintegrowanymi rozwiązaniami tekstronicznymi. W rozważaniach uwzględniono zarówno podstawy działania układów identyfikacyjnych i pomiarowych, jak i charakterystykę ich implementacji na elastycznych, tekstylnych podłożach. Szczególny nacisk położono na te aspekty, które mają bezpośredni związek z budową oraz funkcjonalnością projektowanego identyfikatora RFID z czujnikiem pojemnościowym.

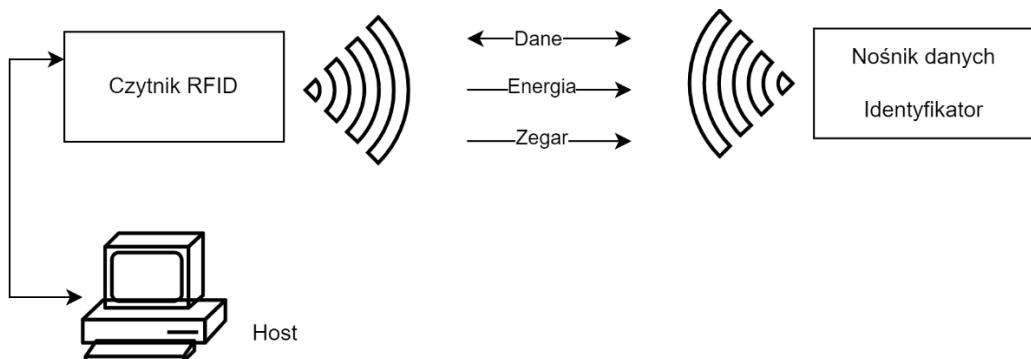
2.1. Technika RFID

Technika identyfikacji radiowej (RFID) stanowi jedno z kluczowych narzędzi współczesnych systemów automatycznej identyfikacji i zbierania danych. Dzięki możliwości komunikacji bezprzewodowej, bez konieczności bezpośredniego kontaktu lub optycznej widoczności, RFID znajduje szerokie zastosowanie w logistyce, handlu, ochronie zdrowia, a także w rozwijającym się dynamicznie obszarze elektroniki ubieralnej i tekstyliów funkcjonalnych. System RFID składa się z trzech podstawowych komponentów: czytnika, anteny oraz identyfikatora (znacznika), przy czym komunikacja pomiędzy nimi odbywa się drogą radiową. W zależności od zastosowanej częstotliwości pracy i typu znacznika, możliwe jest uzyskanie różnych zasięgów oraz prędkości transmisji danych. W kolejnych częściach podrozdziału 2.1. omówiono szczegółowo zasadę działania systemów RFID, charakterystykę pasma HF, standardy ISO związane z tego typu komunikacją, a także budowę identyfikatorów i ich anten.

2.1.1. Zasada działania systemów RFID

Systemy RFID umożliwiają bezkontaktową identyfikację obiektów poprzez transmisję danych między czytnikiem a znacznikiem RFID przy wykorzystaniu fal radiowych. W podstawowej konfiguracji czytnik generuje sygnał elektromagnetyczny, który dociera do identyfikatora i – w zależności od jego konstrukcji – zostaje odbity, zmodulowany lub przetworzony, a następnie zwrócony do czytnika w postaci odpowiedzi zawierającej dane identyfikacyjne.

Zasadę działania tego systemu przedstawiono na rysunku 2.1 [1].



Rys. 2.1. Czytnik oraz identyfikator są głównymi komponentami kazdego systemu RFID

Znaczniki RFID można podzielić na trzy główne kategorie:

- pasywne – pozbawione własnego źródła zasilania, pobierają energię z pola elektromagnetycznego generowanego przez czytnik; są tanie i powszechnie stosowane, lecz cechują się ograniczonym zasięgiem (do kilkudziesięciu centymetrów);
- półpasywne – posiadają wbudowane zasilanie, ale korzystają z pola czytnika do inicjacji transmisji; umożliwiają zastosowanie czujników oraz zapisu danych;
- aktywne – wyposażone w zasilanie i własny nadajnik, co pozwala na znacznie większy zasięg działania (do kilkudziesięciu metrów) i komunikację w trybie ciągłym.

Komunikacja pomiędzy czytnikiem a znacznikiem realizowana jest poprzez jedno z dwóch podstawowych sprzężeń:

- sprzężenie indukcyjne – wykorzystywane w systemach LF i HF, gdzie przekazywana energia i dane bazują na zmiennym polu magnetycznym;
- sprzężenie elektromagnetyczne – dominujące w systemach UHF i mikrofali, gdzie wykorzystywana jest fala elektromagnetyczna w tzw. polu dalekim (ang. *far field*).

Proces wymiany danych przebiega następująco: czytnik inicjuje komunikację, generując sygnał radiowy. Identyfikatory znajdujące się w zasięgu reagują – w przypadku konstrukcji pasywnych – poprzez modyfikację odbieranego sygnału (modulacja zwrotna). Czytnik odbiera odpowiedź i dekoduje dane, np. numer identyfikacyjny EPC (ang. *Electronic Product Code*), zapisany w pamięci znacznika [1].

W przypadku jednoczesnej obecności wielu znaczników w polu odczytu stosuje się algorytmy antykolizyjne, np. metodę drzewa binarnego lub ALOHA, umożliwiające sekwencyjną identyfikację każdego z identyfikatorów bez błędów komunikacyjnych.

2.1.2. Pasmo HF i technologia NFC

Jednym z najczęściej stosowanych pasm pracy systemów RFID jest pasmo HF, obejmujące przedział częstotliwości od 3 MHz do 30 MHz. W kontekście identyfikatorów tekstylnych i technologii NFC szczególne znaczenie ma częstotliwość 13,56 MHz, należąca do nielicencjonowanego pasma ISM (ang. *Industrial, Scientific and Medical*), dostępnego globalnie bez konieczności uzyskiwania zezwolenia radiowego [1].

Systemy RFID działające w paśmie HF wykorzystują sprzężenie indukcyjne, polegające na wzajemnym oddziaływaniu dwóch cewek – jednej znajdującej się w czytniku, a drugiej w identyfikatorze RFID. Taki sposób transmisji umożliwia jednoczesne przesyłanie energii (zasilanie pasywnego układu) oraz danych, co jest szczególnie istotne w kontekście prostych, bezbaterijnych znaczników. Typowy zasięg systemów HF wynosi od kilku do kilkunastu centymetrów, choć w warunkach laboratoryjnych może sięgać do 1 metra, przy zastosowaniu zoptymalizowanych anten [1,2].

Zaletą sprzężenia indukcyjnego jest jego odporność na zakłócenia elektromagnetyczne oraz mniejsza wrażliwość na obecność metali i cieczy w otoczeniu. Cechy te predysponują technologię HF do zastosowań w środowiskach trudnych, a także w materiałach tekstylnych, gdzie geometria anteny bywa nieregularna, a podłożę – podatne na odkształcenia [3].

Technologia NFC stanowi rozwinięcie standardów RFID HF i została ustandaryzowana jako ISO/IEC 18092. Wykorzystuje tę samą częstotliwość 13,56 MHz oraz to samo sprzężenie indukcyjne, lecz działa w trybie dwukierunkowym i umożliwia komunikację nie tylko z pasywnym znacznikiem, ale również pomiędzy dwoma aktywnymi urządzeniami, np. smartfonami [4].

Wyróżnia się trzy tryby pracy NFC:

- tryb pasywny – jedno urządzenie generuje pole elektromagnetyczne, drugie działa jako znacznik pasywny;
- tryb aktywny – oba urządzenia naprzemiennie generują pole, umożliwiając komunikację P2P;
- tryb emulacji karty – urządzenie mobilne (np. smartfon) zachowuje się jak pasywny identyfikator RFID, umożliwiając np. płatności zbliżeniowe.

Zasięg technologii NFC jest bardzo ograniczony i wynosi zazwyczaj poniżej 10 cm, co jednak w wielu zastosowaniach (np. dostęp mobilny, płatności, medycyna) stanowi zaletę, zapewniając większe bezpieczeństwo transmisji [1].

Ze względu na niski pobór mocy, krótki zasięg oraz łatwość integracji z urządzeniami mobilnymi, technologia NFC staje się naturalnym wyborem dla tekstyliów funkcjonalnych, zwłaszcza w kontekście szybkiego odczytu danych z ubieranych czujników. Wbudowanie identyfikatora HF/NFC w tekstylną antenę pozwala na odczyt parametrów środowiskowych lub fizjologicznych z poziomu zwykłego smartfona, bez konieczności stosowania dedykowanych czytników RFID [2,4].

Co istotne, geometria anteny NFC jest dobrze dostosowana do implementacji w materiałach tekstylnych, np. w postaci cewek spiralnych haftowanych przewodzącą nicią. Dzięki temu możliwe jest tworzenie w pełni elastycznych i zginających się układów pomiarowo-identyfikacyjnych [5].

2.1.3. Standardy ISO i protokoły komunikacyjne

Funkcjonowanie systemów RFID opiera się na ścisłych standardach międzynarodowych, które definiują zarówno interfejsy komunikacyjne, jak i protokoły transmisji danych. W przypadku systemów działających w paśmie HF (13,56 MHz), podstawowe znaczenie mają standardy z grupy ISO/IEC 14443, ISO/IEC 15693 oraz ISO/IEC 18000-3. Dodatkowo, dla technologii NFC, istotne są także normy ISO/IEC 18092 oraz ISO/IEC 21481, które definiują komunikację pomiędzy urządzeniami mobilnymi.

Norma ISO/IEC 14443 została opracowana dla kart zbliżeniowych wykorzystywanych m.in. w płatnościach bezdotykowych, e-dowodach osobistych i systemach dostępu. Dzieli się ona na cztery części:

- część 1 – Właściwości fizyczne: określa wymiary i strukturę nośników danych;
- część 2 – Interfejs radiowy i zasilanie: definiuje sposób zasilania znacznika z pola magnetycznego czytnika oraz warstwę fizyczną transmisji;
- część 3 – Inicjalizacja i antykolizja: opisuje procedury identyfikacji i unikania kolizji pomiędzy wieloma identyfikatorami;
- część 4 – Protokoły transmisji: zawiera szczegółowe protokoły wymiany danych, zgodne z ISO/IEC 7816 (standard dla kart mikroprocesorowych) [1].

Norma ta zakłada pracę na odległość do 10 cm i jest kompatybilna z trybem „karty” w technologii NFC.

Standard ISO/IEC 15693 dotyczy zaczników działających również przy częstotliwości 13,56 MHz, ale przy większym zasięgu – sięgającym nawet 1 metra. Podobnie jak ISO/IEC 14443, składa się z trzech części: fizycznej, warstwy łącza oraz protokołu komunikacyjnego.

Z uwagi na większy zasięg i niższą szybkość transmisji, norma ta wykorzystywana jest m.in. w bibliotekach, zarządzaniu dokumentacją techniczną czy w systemach śledzenia wyposażenia [1].

Norma ISO/IEC 18000-3 stanowi część zbiorczego zestawu standardów 18000 (części 1–7), obejmujących wszystkie pasma pracy systemów RFID. Część 3 dotyczy właśnie zakresu HF i definiuje interfejs powietrzny pomiędzy identyfikatorem a czytnikiem. Specyfikuje dwa tryby pracy:

- tryb 1: klasyczny, zgodny z ISO/IEC 15693;
- tryb 2: alternatywny, zoptymalizowany pod kątem szybszej transmisji i większej odporności na zakłócenia [1].

Standard ISO/IEC 18092 opisuje zasady komunikacji w systemie NFCIP-1, będącym podstawą dla technologii NFC. Umożliwia komunikację P2P, a także z urządzeniami pasywnymi, w tym ze znacznikami zgodnymi z ISO/IEC 14443. Komplementarny standard ISO/IEC 21481 (NFCIP-2) rozszerza tę funkcjonalność o zgodność z identyfikatorami opartymi na ISO/IEC 15693, zapewniając interoperacyjność pomiędzy różnymi typami nośników danych.

Dzięki tej uniwersalności, urządzenia mobilne (np. smartfony) są w stanie odczytywać dane zarówno z kart miejskich, paszportów biometrycznych, jak i tekstylnych czujników RFID pracujących w paśmie HF.

2.1.4. Budowa identyfikatora RFID

Identyfikator RFID jest zasadniczym elementem systemu RFID, zawierającym dane identyfikacyjne i – w bardziej zaawansowanych wersjach – także funkcje logiczne lub pomiarowe. Niezależnie od pasma pracy i typu zasilania, każdy składa się zasadniczo z trzech elementów: układu scalonego RFID, anteny oraz opcjonalnego źródła zasilania (dla znaczników aktywnych). W przypadku identyfikatorów HF, szczególnie tych opartych na technologii NFC, jest on zwykle urządzeniem pasywnym, zasilanym z pola elektromagnetycznego czytnika, co upraszcza jego konstrukcję i umożliwia miniaturyzację.

Układ scalony pełni funkcję głównego kontrolera: odbiera i dekoduje sygnały z czytnika, zarządza transmisją zwrotną, a także obsługuje wewnętrzną pamięć. W nowoczesnych rozwiązańach – takich jak RF430FRL152H firmy Texas Instruments – układ ten może w sobie zawierać również:

- mikrokontroler (MSP430),

- interfejs NFC zgodny z ISO/IEC 15693 i 18000-3,
- przetwornik analogowo-cyfrowy (ADC),
- interfejs I²C do komunikacji z czujnikami,
- układ zasilania z odzysku energii RF (z ang. *harvester*).

Dzięki temu możliwe jest budowanie pasywnych, energooszczędnych identyfikatorów z możliwościami pomiarowymi, bez konieczności stosowania baterii. To szczególnie ważne w aplikacjach tekstylnych, gdzie elastyczność i brak zasilania przewodowego są kluczowe [4].

Układy RFID składają się zazwyczaj z trzech typów pamięci:

- ROM – zawierająca dane systemowe i firmware,
- EEPROM/FRAM – zapisywana pamięć użytkownika (np. numer seryjny, dane pomiarowe),
- RAM – wykorzystywana tymczasowo w czasie transmisji.

Pamięć dostępna dla użytkownika może wynosić od kilku bajtów do kilkunastu kilobajtów, co w systemach NFC wystarcza na zapis parametrów czujnika, identyfikatorów, danych konfiguracyjnych itp.

Antena, najczęściej w postaci płaskiej spirali (cewki), pełni dwojaką rolę: odbiera energię z pola elektromagnetycznego generowanego przez czytnik oraz umożliwia dwukierunkową transmisję danych. Jej projektowanie jest ściśle związane z częstotliwością pracy oraz charakterystyką podłoża – co zostanie szerzej omówione w podrozdziale 2.1.5.

W przypadku znaczników pasywnych, energia potrzebna do działania układu jest pozyskiwana z pola elektromagnetycznego (z ang. *RF energy harvesting*). Współczesne układy RFID HF/NFC potrafią pracować przy bardzo niskich mocach wejściowych, co umożliwia ich zasilanie nawet z krótkotrwałego kontaktu z czytnikiem NFC w smartfonie.

W identyfikarach półaktywnych, zasilanie z baterii służy do zasilania np. czujników lub układów logiki, ale komunikacja z czytnikiem nadal odbywa się pasywnie, co pozwala na zwiększenie funkcjonalności bez znaczącego wzrostu poboru mocy.

2.1.5. Anteny RFID

Anteny w systemach RFID pełnią kluczową funkcję zarówno w zakresie odbioru energii, jak i transmisji danych pomiędzy znacznikiem a czytnikiem. W przypadku identyfikatorów działających w paśmie HF, jak również w technologii NFC, antena ma zazwyczaj postać planarnej cewki (z ang. *spiral loop*) o wysokiej indukcyjności, sprzężonej magnetycznie z anteną czytnika.

W systemach HF antena znacznika tworzy wraz z anteną czytnika transformator powietrzny. Pole magnetyczne wytworzone przez cewkę nadawczą indukuje napięcie w cewce odbiorczej znacznika RFID. To zjawisko sprzężenia indukcyjnego umożliwia zarówno zasilenie układu scalonego znacznika, jak i transmisję danych – poprzez modulację odpowiedzi w postaci zmiany impedancji anteny (ang. *load modulation*).

Parametry anteny (liczba zwojów, średnica, szerokość ścieżki, odległości między zwojami) są ściśle powiązane z wymaganiami dotyczącymi rezonansu przy częstotliwości 13,56 MHz, a także z dopasowaniem do wejścia układu RFID [2,6].

Dla anten planarnych (spiralnych) projektowanych na płaskim podłożu, kluczowe jest osiągnięcie odpowiedniej indukcyjności własnej, która – po dołączeniu kondensatora – pozwala uzyskać rezonans w zakresie HF. Indukcyjność prostokątnej spirali może być szacowana z użyciem wzoru Mohana:

$$L = \frac{2\mu_0 N^2 a}{1 + 2,75 \left(\frac{w}{s} \right)} \quad (2.1)$$

gdzie: N – liczba zwojów, a – średni promień spirali, w – szerokość ścieżki, s – odstęp między ścieżkami.

Wartość indukcyjności anteny HF zwykle mieści się w przedziale 1–3 μH , w zależności od wymiarów i podłoża. W przypadku znaczników RFID NFC, typowa wartość to ok. 1,5 μH [4].

2.1.6. Czytniki i interfejsy mobilne

Czytniki RFID stanowią element aktywny systemu, który inicjuje transmisję, dostarcza energię do pasywnych znaczników oraz odbiera dane z ich układów scalonych. W zależności od pasma pracy, zastosowania i sposobu komunikacji wyróżnia się różne klasy czytników, przy czym w kontekście rozwiązań NFC/HF stosowanych w tektronice szczególną rolę odgrywają czytniki mobilne zintegrowane w urządzeniach konsumenckich, takich jak smartfony i tablety.

Tradycyjne czytniki RFID wykorzystywane są przede wszystkim w systemach przemysłowych i magazynowych. Działają w paśmie LF, HF lub UHF, a ich konstrukcja obejmuje antenę nadawczo-odbiorczą, układ nadawania i odbioru (modulacja/demodulacja), procesor sterujący i komunikacyjny (często z interfejsem UART, USB, Ethernet lub Bluetooth).

W systemach HF czytniki te zazwyczaj bazują na cewkach sprzężonych indukcyjnie z anteną identyfikatora. Transmisja oparta jest na standardach ISO/IEC 14443 lub ISO/IEC 15693, co zapewnia kompatybilność ze znacznikami NFC i kartami zbliżeniowymi.

W ostatnich latach rozwój technologii Near Field Communication sprawił, że większość nowoczesnych smartfonów wyposażona jest w zintegrowany czytnik NFC. Urządzenia te, działające w paśmie 13,56 MHz, mogą pracować w trybie:

- czytnika identyfikatorów pasywnych (np. etykiet NFC, znaczników tekstylnych),
- emulacji karty (np. Google Pay, e-dowód osobisty),
- komunikacji peer-to-peer (np. wymiana danych między telefonami).

Dzięki zgodności z normami ISO/IEC 18092, 14443 i 15693, smartfony mogą komunikować się z szeroką gamą znaczników RFID, w tym także ze stosowanymi do budowy zintegrowanych czujników tekstylnych [2].

Ważną cechą jest również dostępność interfejsów programistycznych (API) w systemach Android i iOS, które umożliwiają tworzenie dedykowanych aplikacji do odczytu danych z czujników, zapisu parametrów konfiguracyjnych, zarządzania transmisją (np. inicjacja tylko przy określonym czasie kontaktu).

Zintegrowanie czytnika w urządzeniu mobilnym znacznie upraszcza architekturę systemów pomiarowych, ponieważ eliminuje konieczność stosowania dedykowanych interfejsów diagnostycznych. Umożliwia to stworzenie systemów typu „plug-and-read”, w których użytkownik może – bez skomplikowanej konfiguracji – odczytać dane z czujnika tekstylnego poprzez zbliżenie telefonu do tkaniny zawierającej antenę NFC i układ RFID [2,3].

Tego rodzaju podejście otwiera drogę do praktycznych zastosowań tektroniki w medycynie (np. odczyt parametrów ciała z odzieży medycznej), sporcie (monitorowanie nawodnienia, napięcia mięśni), kontroli dostępu (np. opaski zintegrowane z identyfikatorem NFC), przemyśle odzieżowym (inteligentne metki, zarządzanie produkcją).

2.2. Tektronika i układy zintegrowane z materiałami

Rozwój nowoczesnych systemów elektronicznych coraz częściej przebiega w kierunku integracji z niestandardowymi podłożami, takimi jak folie elastyczne, tworzywa sztuczne, a przede wszystkim – materiały tekstylne. Tektronika, będąca połączeniem tekstyliów i elektroniki, otwiera nowe możliwości w dziedzinie odzieży funkcjonalnej, systemów ubieralnych, urządzeń medycznych, monitoringu środowiskowego oraz interfejsów człowiek–maszyna. Integracja tych dwóch dziedzin wymaga jednak spełnienia szeregu wymagań zarówno mechanicznych, jak i elektrycznych – dotyczących materiałów, metod łączenia oraz funkcjonalności w warunkach rzeczywistych.

2.2.1. Wprowadzenie do tektroniki i smart textiles

Tektronika, określana również jako „elektronika tekstylna”, obejmuje technologię polegającą na łączeniu właściwości mechanicznych i strukturalnych materiałów włókienniczych z funkcjonalnością układów elektronicznych. Celem tych rozwiązań jest stworzenie materiałów i produktów, które są jednocześnie elastyczne, lekkie, wygodne w noszeniu oraz zdolne do przetwarzania i przesyłania danych, zbierania sygnałów fizjologicznych lub reagowania na bodźce zewnętrzne. Smart textiles, czyli inteligentne tekstyla, można podzielić na trzy podstawowe grupy: pasywne (zdolne do odbierania bodźców), aktywne (zdolne do odbioru i reakcji) oraz inteligentne (zdolne do samodzielnego przetwarzania informacji i adaptacji). Tektronika najczęściej dotyczy rozwijań z drugiej i trzeciej grupy – szczególnie takich, które zawierają układy elektroniczne do zbierania danych, ich przetwarzania oraz bezprzewodowej komunikacji z otoczeniem [7].

Charakterystyczną cechą systemów tekstronicznych jest ich wielowarstwość i integracja komponentów funkcjonalnych (czujników, przewodów, przetworników, anten) z klasycznymi strukturami tekstylnymi. Elementy te mogą być wykonane w formie przedzyj przewodzącej, włókien optycznych, nadruków przewodzących, wstawek elektronicznych lub mikrosystemów typu system-on-textile (SoT). Rozwój tektroniki wynika z potrzeby tworzenia systemów, które są bardziej zintegrowane z ciałem użytkownika i środowiskiem niż klasyczne urządzenie noszone (wearables), jak zegarki czy opaski. Integracja elektroniki z tkaniną pozwala na niezauważalne dla użytkownika śledzenie parametrów fizjologicznych, kontrolę postawy, detekcję ruchu czy analizę otoczenia, zachowując jednocześnie komfort i estetykę tradycyjnej odzieży. Dzięki dynamicznemu postępowi w dziedzinie nanomateriałów, elastycznych układów scalonych oraz technik wytwarzania opartych na drukowaniu, szyciu i haftowaniu, tektronika zyskuje coraz szersze zastosowanie w praktyce, obejmując nie tylko prototypy laboratoryjne, ale również produkty komercyjne, takie jak inteligentna odzież sportowa, elementy odzieży ochronnej, a nawet systemy rehabilitacyjne i interfejsy haptyczne.

2.2.2. Przewodzące przędze i materiały dielektryczne

Podstawą każdej funkcjonalnej struktury tekstronicznej są odpowiednio dobrane materiały, które umożliwiają realizację zadań elektrycznych i mechanicznych przy zachowaniu charakteru tkaniny. W przypadku czujników pojemnościowych kluczowe są dwa typy materiałów: przewodzące, wykorzystywane do formowania elektrod oraz dielektryczne, stanowiące izolację między nimi. Materiałami przewodzącymi stosowanymi w tektronice są

najczęściej specjalistyczne przedze lub nici pokryte metalami, przewodzące powłoki nanoszone na włókna syntetyczne albo specjalnie wytwarzane kompozyty. Jednym z najczęściej spotykanych rozwiązań są przedze poliamidowe pokryte srebrem, które łączą dobre właściwości przewodzące z elastycznością i możliwością przetwarzania technikami tekstylnymi, takimi jak haft lub szycie. W badaniach Tabor J. i współautorów wykorzystano przedzę Shieldex 235/36, której rezystancja wynosiła około $0,29 \Omega/\text{cm}$. Nici te zostały wykorzystane do stworzenia macierzy czujników pojemnościowych poprzez zszycie na tkaninie, tworząc sieć texeli o kontrolowanej geometrii. Wybór odpowiedniego materiału dielektrycznego jest równie istotny. W systemach ubieralnych stosuje się najczęściej elastyczne materiały tekstylne, które są dostępne w postaci pianek, włóknin lub laminatów. Ważnymi cechami takiego materiału są: względna przenikalność elektryczna, odporność na wilgoć, sprężystość mechaniczna oraz możliwość powtarzalnego odkształcania bez degradacji struktury. W konstrukcji opisanej przez Tabor et al. jako dielektryk zastosowano włókninę na bazie kopolimeru styren-etylen-butylem-styren (SEBS), który charakteryzuje się niskim pochłanianiem wilgoci oraz stabilną przenikalnością elektryczną. Materiał ten był odporny na odkształcania i dobrze sprawdzał się w długotrwałym kontakcie z ciałem użytkownika [8].

Z literatury wynika, że przenikalność elektryczna większości tkanin dielektrycznych waha się w przedziale od 1,5 do 3,5, w zależności od ich gęstości, wilgotności oraz rodzaju zastosowanego włókna. W badaniach Su H. podkreślono, że zastosowanie dielektryków mikroporowatych (np. pianek PU) może znaczco zwiększyć czułość czujnika, ponieważ struktura taka łatwiej ulega kompresji, co przekłada się na większe zmiany pojemności w odpowiedzi na nacisk [9].

Materiały przewodzące i dielektryczne wykorzystywane w tektronice muszą być również odporne na działanie czynników zewnętrznych, takich jak wilgoć, pot, temperatura czy pranie. Dlatego w praktyce często stosuje się dodatkowe powłoki ochronne lub materiały kompozytowe, które łączą wymagania elektryczne z odpornością mechaniczną. Stabilność materiałów w cyklach użytkowania jest warunkiem koniecznym do uzyskania powtarzalnych wyników pomiarowych w aplikacjach wymagających długotrwałego noszenia.

Dobór przedzy oraz materiału dielektrycznego w projekcie bazował na kryteriach wynikających z przeglądu literatury: niskiej rezystancji, elastyczności oraz odporności na wilgoć. W pracy zdecydowano się na przedzę srebrzoną Shieldex, głównie ze względu na dostępność.

2.2.3. Przykłady integracji elektroniki z odzieżą

Integracja komponentów elektronicznych z odzieżą jest podstawowym zadaniem tektroniki, którego skuteczna realizacja zależy od właściwego doboru materiałów, metod przetwarzania oraz rozwiązań konstrukcyjnych. Systemy tego typu projektuje się tak, by elementy funkcjonalne – takie jak czujniki, przewody, układy pomiarowe czy anteny – mogły być trwale i dyskretnie wbudowane w tkaniny, bez pogarszania ich właściwości użytkowych.

Jednym z częściej spotykanych przykładów integracji jest zastosowanie haftowanych struktur przewodzących do realizacji czujników pojemnościowych lub rezystancyjnych. Haft pozwala na precyzyjne umieszczenie przewodzących nici w strukturze tkaniny z zachowaniem jej elastyczności i przepuszczalności powietrza. W badaniach Tabor J. i współautorów zaprezentowano zastosowanie przedzy srebrzonej do formowania matrycy czujników wewnętrz protezy kończyny dolnej. Przewodzące nici tworzyły układ prostopadle przecinających się ścieżek, między którymi znajdował się dielektryk tekstylny. System pozwalał na dokładne monitorowanie rozkładu nacisku w czasie rzeczywistym, z możliwością integracji z mobilnym systemem rejestracji danych [8].

Kolejnym obszarem zastosowań są tekstylne anteny RFID/NFC, które mogą być wykonane z przewodzącej przedzy i zintegrowane z odzieżą w formie spirali, pętli lub struktury planarnej. Anteny takie umożliwiają komunikację z urządzeniami zewnętrznymi, takimi jak smartfony, i mogą być częścią pasywnych znaczników wykorzystywanych do identyfikacji, autoryzacji dostępu lub zbierania danych z czujników. W przypadku tekstyliów szczególnie znaczenie ma zachowanie stabilności parametrów anteny przy zginaniu, ściskaniu i zmianach wilgotności. Przykłady takich rozwiązań obejmują tekstylne opaski z funkcją NFC oraz odzież ochronną z wbudowanymi znacznikami HF.

W literaturze opisano również integrację układów przetwarzających sygnał, takich jak przetworniki analogowo-cyfrowe, mikrokontrolery lub moduły transmisji bezprzewodowej. Komponenty te mogą być umieszczone na elastycznych płytach PCB, wszyte w tekstylne kieszenie lub przymocowane do tkaniny z użyciem przewodzących taśm i złączy. W projektach ukierunkowanych na monitorowanie aktywności ruchowej lub parametrów fizjologicznych stosuje się także zintegrowane układy zasilające, takie jak elastyczne baterie litowo-polimerowe lub superkondensatory tekstylne [7].

Do szczególnie zaawansowanych zastosowań należą kombinezony pomiarowe, które zawierają gęstą sieć czujników umieszczonych w newralgicznych miejscach ciała, połączonych magistralą wykonaną z przedzy przewodzącej. Dane zbierane z czujników mogą być

wykorzystywane do analizy biomechanicznej, diagnostyki postawy, sterowania interfejsami człowiek–maszyna, a nawet do wczesnego wykrywania objawów przeciążeniowych lub patologicznych.

Przykłady opisane w literaturze pokazują, że możliwe jest osiągnięcie pełnej integracji funkcjonalnych elementów elektronicznych z odzieżą, bez utraty komfortu i użyteczności. W miarę rozwoju materiałów, technologii przetwarzania oraz elektroniki elastycznej, systemy tekstroniczne stają się coraz bardziej niezawodne, skalowalne i gotowe do komercjalizacji.

2.2.4. Wyzwania rozwoju tektroniki

Mimo znaczącego postępu w dziedzinie tektroniki i elektroniki ubieralnej, praktyczna implementacja rozwiązań tekstylnych w rzeczywistych warunkach użytkowania nadal wiąże się z wieloma wyzwaniami technologicznymi. Dotyczą one przede wszystkim aspektów związanych z elastycznością materiałów, zasilaniem układów, niezawodną komunikacją oraz trwałością komponentów podczas długotrwałego użytkowania.

Jednym z podstawowych wyzwań pozostaje zapewnienie odpowiedniego stopnia elastyczności całego układu, nie tylko na poziomie materiałów bazowych, lecz również w obrębie elementów aktywnych, takich jak czujniki, anteny czy układy przetwarzania sygnału. Choć same tkaniny i przędze przewodzące są elastyczne, integracja z nimi standardowych komponentów elektronicznych – jak przetworniki czy układy scalone – wymaga zastosowania specjalnych technik łączenia, często opartych na elastycznych laminatach PCB lub interfejsach opartych na złączach tekstylnych. Niewłaściwie zaprojektowane połączenia mogą prowadzić do pęknięcia, zwarć lub zerwania ścieżek podczas zginania i prania.

Kolejnym istotnym problemem jest zasilanie układów tekstronicznych. Większość stosowanych obecnie rozwiązań opiera się na bateriach litowo-polimerowych, które, choć oferują odpowiednią gęstość energii, ograniczają elastyczność układu i wymagają okresowego ładowania. Alternatywą są elastyczne superkondensatory tekstylne lub systemy odzysku energii (np. poprzez indukcję magnetyczną, triboelektrykę czy piezoelektrykę), lecz rozwiązania te znajdują się jeszcze w fazie badań. W układach pasywnych RFID/NFC możliwe jest zasilanie ze źródła zewnętrznego, jednak efektywność takiego transferu jest ograniczona zasięgiem sprzężenia i warunkami środowiskowymi.

Równie ważnym aspektem pozostaje zapewnienie niezawodnej komunikacji. W przypadku identyfikatorów RFID/NFC ograniczeniem jest krótki zasięg transmisji oraz wrażliwość anteny na deformacje mechaniczne. Zmiana geometrii spirali antenowej, zakłócenia elektromagnetyczne lub obecność wilgoci mogą skutkować spadkiem czułości oraz

błędami w transmisji danych. Aby temu przeciwdziałać, projektanci stosują ekrany elektromagnetyczne z materiałów przewodzących lub optymalizują geometrię anten poprzez symulacje elektromagnetyczne.

Trwałość to kolejne krytyczne zagadnienie. Czujniki tekstylne narażone są na powtarzalne naprężenia mechaniczne, ścieranie, pranie, działanie potu i detergentów. Skuteczne zabezpieczenie komponentów wymaga stosowania warstw ochronnych, np. z elastycznych laminatów lub powłok silikonowych, które jednocześnie nie pogarszają właściwości sensorycznych materiału. Równocześnie należy zapewnić odpowiednią stabilność parametrów elektrycznych układu w długim okresie użytkowania, co wymaga starannego doboru materiałów i technologii montażu.

Opisane wyzwania wskazują, że choć wiele rozwiązań tekstronicznych jest już możliwych do wdrożenia, to ich upowszechnienie wymaga dalszych badań nad materiałami, metodami integracji oraz odpornością układów na działanie warunków zewnętrznych. Pokonanie tych barier umożliwi powstanie niezawodnych i szeroko dostępnych systemów ubieralnych, integrujących elektronikę z codziennym ubiorem w sposób funkcjonalny i niewidoczny dla użytkownika.

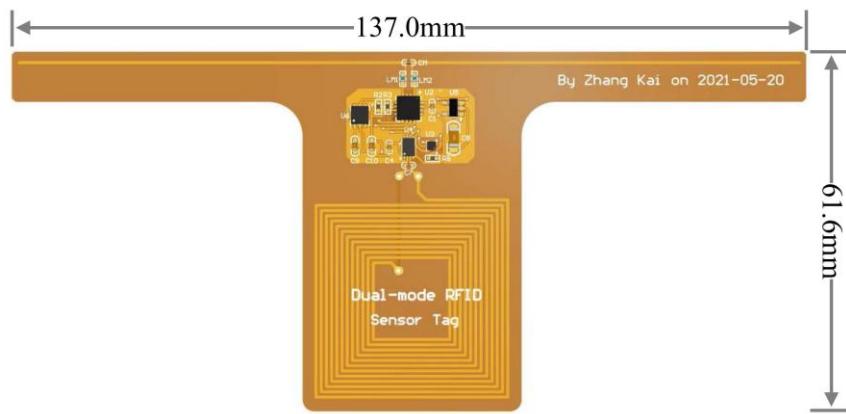
2.3. RFID na podłożach elastycznych i tekstylnych

Integracja technologii RFID z podłożami elastycznymi, a zwłaszcza z tkaninami, stanowi ważny kierunek rozwoju systemów identyfikacji w kontekście nowoczesnych aplikacji ubieralnych, medycznych oraz przemysłowych. W odróżnieniu od klasycznych identyfikatorów wykonywanych na sztywnych laminatach, rozwiązania tekstroniczne charakteryzują się wysoką elastycznością, odpornością na zginanie, a także możliwością dyskretnej integracji z odzieżą użytkową.

2.3.1. Przegląd rozwiązań elastycznych identyfikatorów RFID

W ostatnich latach obserwuje się intensywny rozwój systemów RFID opartych na elastycznych podłożach. Celem takich rozwiązań jest zapewnienie pełnej funkcjonalności układów identyfikacyjnych przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej giętkości mechanicznej, niskiej masy i kompatybilności z powierzchniami zakrzywionymi. Szczególnie istotne są one w aplikacjach ubieralnych, gdzie identyfikator RFID może być zintegrowany z odzieżą, opaskami, elementami wyposażenia ochronnego lub inteligentnych tekstyliów. Elastyczne znaczniki RFID są zwykle wytwarzane z wykorzystaniem cienkowarstwowych struktur, takich jak folie poliestrowe (PET), folie poliimidowe (Kapton), elastomery silikonowe (np. PDMS),

materiały kompozytowe z warstwą przewodzącą (np. srebro, miedź, nanomateriały). Na tych podłożach implementuje się cewki antenowe oraz montuje układy scalone RFID, tworząc tzw. *flex-tags*. Techniki produkcji obejmują m.in. drukowanie przewodzące (ink-jet, sitodruk), osadzanie warstw metalicznych, a także laminowanie i gięcie. Przykładem tego typu rozwiązania jest przedstawiony przez Zhang Kai zintegrowany czujnik RFID UHF-HF, w którym antenę i układ znacznika zamontowano na giętkim laminacie (rys. 2.2).



Rys. 2.2. Zaprojektowany przez Zhang Kai dwupasmowy czujnik RFID UHF-HF

Za sterowanie całym systemem odpowiada mikrokontroler, który obsługuje interfejsy SPI i I²C, umożliwiające komunikację z pozostałymi komponentami. W urządzeniu zastosowano moduł RFID UHF Rocky100 firmy Farsens, który działa na częstotliwości 915–920 MHz i jest zgodny ze standardem EPC-C1G2. Moduł ten posiada 128-bitową pamięć EPC oraz 96-bitowy identyfikator TID, a jego najważniejszą cechą jest możliwość działania w trybie w pełni pasywnym, dzięki pobieraniu energii z fal UHF. Do komunikacji z mikrokontrolerem wykorzystano interfejs SPI, który pozwala na zapis i odczyt danych. Drugim modułem RFID jest M24LR16E firmy STMicroelectronics, który obsługuje technologię HF/NFC działającą na częstotliwości 13.56 MHz. Moduł ten posiada 16-kilobitową pamięć EEPROM oraz obsługuje standard ISO 15693, co umożliwia łatwe odczytywanie zapisanych w nim informacji za pomocą smartfonów z modułem NFC. Komunikacja z mikrokontrolerem odbywała się poprzez interfejs I²C, a dane przechowywano w formacie NFC Data Exchange Format (NDEF), co pozwoliło na ich prostą interpretację przez urządzenia mobilne. W systemie zastosowano czujniki temperatury i wilgotności, jednak ich dokładny model nie został określony w pracy. Podczas testów referencyjnych wykorzystano „Xiaomi Temperature and Humidity Meter”. Anteny RFID odgrywają kluczową rolę w działaniu systemu. Antena UHF to półfalowa antena dipolowa, wykonana na cienkim podłożu poliamidowym o grubości 0.16 mm i maksymalnym

zasięg odczytu 52 cm. Z kolei antena HF miała postać planarnej spirali o wymiarach 34×33 mm, składającej się z 12 zwojów, co pozwalało jej na efektywne pobieranie energii i komunikację na krótkim dystansie. Pod względem działania, system aktywowany był przez zbliżenie czytnika RFID lub smartfona z modułem NFC. Odbierana energia zasilała układ RFID oraz mikrokontroler, który następnie aktywował czujniki temperatury i wilgotności. Zebrane dane były przetwarzane i zapisywane w pamięci EEPROM modułu RFID, a następnie odczytywane poprzez UHF RFID lub HF/NFC. Informacje przesyłane w trybie UHF były kodowane w standardzie EPC-C1G2, natomiast w trybie HF wykorzystywany był format NDEF, co zapewniało kompatybilność z istniejącą infrastrukturą IIoT. System został przetestowany w warunkach laboratoryjnych, w tym w eksperymentach monitorujących temperaturę i wilgotność pakowanego mięsa. Wyniki potwierdziły, że urządzenie skutecznie mierzy i przesyła dane w czasie rzeczywistym, co może mieć zastosowanie w logistyce żywności, monitorowaniu łańcucha dostaw, przemyśle farmaceutycznym oraz inteligentnych opakowaniach. Największymi zaletami rozwiązania są jego podwójna kompatybilność z UHF i HF/NFC, brak potrzeby stosowania baterii, elastyczna konstrukcja oraz możliwość integracji z systemami IIoT. Ograniczenia obejmują maksymalny zasięg odczytu UHF wynoszący 52 cm oraz wpływ kąta ustawienia anteny HF na jakość transmisji danych [10]. Innym przykładem jest elastyczny znacznik RFID do pomiaru zawartości minerałów w wodzie pitnej działający na zasadzie bezprzewodowego zasilania i komunikacji za pomocą technologii NFC w smartfonie. System składa się z trzech głównych modułów: czujnika pojemnościowego, układu sterującego oraz modułu zasilania i komunikacji RFID (rys. 2.3)



Rys. 2.3. Schemat działania [11]

Czujnik pojemnościowy został zaprojektowany w formie płaskiego sensora wykonanego na elastycznej płytce PCB, który mierzy zmiany właściwości dielektrycznych wody w zależności od zawartości minerałów. Do konwersji danych analogowych na cyfrowe wykorzystano precyzyjny przetwornik PCAP02, który odczytuje zmiany pojemności i przekazuje je do mikrokontrolera MSP430FR2433. Mikrokontroler odpowiada za sterowanie

całym procesem pomiarowym, przetwarzanie danych oraz ich zapis w pamięci EEPROM układu RFID M24LR16E.

Komunikacja ze smartfonem odbywa się poprzez NFC, co pozwala na bezpośredni odczyt wyników bez konieczności instalowania dodatkowego oprogramowania. Zasilanie systemu odbywa się bezprzewodowo dzięki indukcyjnemu sprzężeniu RFID, co eliminuje potrzebę stosowania baterii. Specjalnie zaprojektowana cewka antenowa o wymiarach 35 mm × 35 mm i 12 zwojach jest dostrojona do częstotliwości 13.56 MHz, zapewniając maksymalną efektywność transmisji energii i danych. Urządzenie jest lekkie, cienkie i elastyczne, co pozwala na jego łatwy montaż na różnych pojemnikach. Dzięki bezkontaktowej metodzie pomiaru sensor nie ulega degradacji w wyniku kontaktu z wodą, co zapewnia długotrwałe i niezawodne działanie. Odczyt wyników następuje poprzez zwykłe przyłożenie smartfona do znacznika RFID, a dane wyświetlane są natychmiast na ekranie w formacie NFC Data Exchange Format (NDEF). System jest wygodnym i nowoczesnym rozwiązaniem umożliwiającym szybkie i łatwe monitorowanie jakości wody w domowych warunkach [11].

Elastyczne identyfikatory RFID mogą być montowane na nieregularnych powierzchniach, są lekkie i cienkie, dobrze znoszą zginanie i odkształcenia (do pewnego limitu), nadają się do laminowania z tkaninami lub wbudowania w warstwy wielomateriałowe. Niemniej jednak, klasyczne znaczniki na elastycznych foliach mają też pewne ograniczenia. Najczęściej dotyczą one trwałości mechanicznej (ścieranie, rozciąganie), podatności na wilgoć i temperaturę, utrudnionej integracji z miękkimi, porowatymi materiałami, jakimi są tekstylia. Dlatego coraz częściej kieruje się uwagę nie tylko na „elastyczność”, ale na pełną integrację z tkaniną, która jest przedmiotem kolejnego podrozdziału.

2.3.2. Tekstroniczne anteny i znaczniki – projektowanie i haft

W odróżnieniu od klasycznych identyfikatorów RFID wykonywanych na elastycznych podłożach polimerowych, znaczniki tekstylne powstają poprzez bezpośrednią integrację elementów elektronicznych z materiałami włókienniczymi. Takie podejście wymaga nie tylko zastosowania elastycznych komponentów, ale także technologii przetwarzania zgodnych z charakterystyką tekstyliów, takich jak haft, szycie, laminowanie oraz nadruk przewodzący. Integracja anten RFID z materiałami tekstylnymi wymaga zastosowania przewodzących nici lub taśm oraz uwzględnienia właściwości dielektrycznych podłoża. Prawidłowe zaprojektowanie anteny na podłożu tekstylnym wymaga również symulacji elektromagnetycznych oraz doboru kondensatora kompensującego w celu osiągnięcia

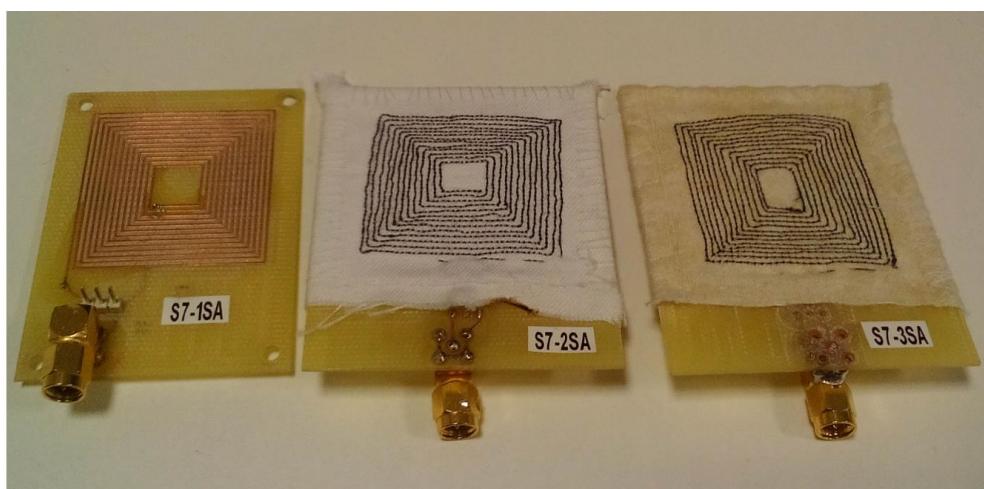
rezonansu 13,56 MHz – tak jak w przypadku anteny zintegrowanej z układem RF430FRL152H [2,4].

W literaturze technicznej opisano liczne konstrukcje anten RFID zaprojektowanych specjalnie z myślą o integracji z tekstyliami. Poniżej przedstawiono wybrane przykłady pokazujące różnorodność podejść projektowych oraz właściwości mechaniczne i elektromagnetyczne takich układów. W tego typu rozwiązaniach stosuje się najczęściej spiralne cewki haftowane przewodzącą przedzą, np. srebrzoną lub ze stopów miedzi. Wpływ na charakterystykę anteny mają m.in.:

- grubość przedzy i jej rezystywność,
- liczba warstw haftu (dla zwiększenia przewodnictwa),
- sztywność tkaniny i jej wpływ na zagięcia spirali,
- tłumienie sygnału w warunkach użytkowych (np. wilgoć, pot, zginanie).

Jednym z najczęściej stosowanych rozwiązań jest tworzenie spiralnych anten planarnych haftowanych przewodzącą przedzą. Antena taka składa się z kilku zwojów nici wyszytych w kształcie kwadratowej lub okrągłej spirali, w której istotne są liczba zwojów (np. 3–6), szerokość i odległość między ścieżkami, rezystywność nici, stałe dielektryczne materiału bazowego [3].

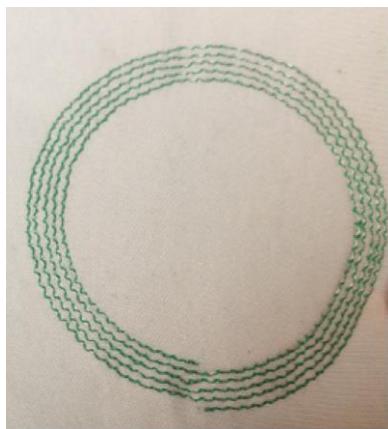
W pracy Del-Rio-Ruiz R. przedstawiono zaawansowany projekt w pełni tekstylnej spiralnej anteny NFC, zbudowanej na flaneli oraz tkaninie poliestrowo-bawełnianej (PES/CO), z wykorzystaniem dwuwarstwowej przewodzącej przedzy. Antena została wykonana w całości z tekstylnych warstw – spiralny kształt uzyskano przez przeszycie dwuwarstwowej przewodzącej nici (2-ply) na podłożach flanelowych oraz poliestrowo-bawełnianych (rys. 2.4).



Rys. 2.4. Anteny wykonane na PCB (S7-1SA), z poliestru i bawełny (PES-CO) (S7-2SA) oraz z flaneli (S7-3SA) [6]

Autorzy przeprowadzili porównanie z klasyczną anteną PCB na laminacie FR4, badając m.in. parametry rezonansowe, współczynnik odbicia oraz trwałość anteny w warunkach użytkowania. Następnie antena została zintegrowana z układem NFC i wszyta w opaskę z materiału skórzaneego. Prototyp został użytkowany przez rok i wykazał stabilne właściwości w warunkach rzeczywistych: przy wyginaniu, zgniataniu, zawiłgoceniu, a także pod wpływem zmian temperatury i naprężeń mechanicznych. Odczyt danych z układu był porównywalny z komercyjną kartą MIFARE i odbywał się bez błędów w 100% prób. Projekt ten stanowi przykład kompleksowego i wysoce funkcjonalnego rozwiązania tekstronicznego, gotowego do zastosowania w praktycznych aplikacjach ubieralnych, takich jak identyfikacja osobista, dostęp NFC czy monitorowanie parametrów środowiskowych. Zastosowanie flaneli jako materiału dielektrycznego, przy odpowiednim doborze parametrów geometrycznych anteny (np. $L \approx 5 \mu\text{H}$), pozwoliło osiągnąć rezonans w paśmie 13,56 MHz po zastosowaniu kompensacji pojemnościowej. Całość przeszła pomyślnie testy użytkowe w warunkach rzeczywistych – przez ponad rok działania odczyt był porównywalny z kartami MIFARE, mimo regularnego zginania, zwilżania i ściskania materiału [6].

Innym interesującym przypadkiem jest CPC (Coupled Planar Coil) antenna, zaprojektowana jako czujnik przemieszczeń w systemie NFC. W tym projekcie zastosowano dwie wzajemnie sprzężone cewki o specjalnie dobranym rozmiarze i liczbie zwojów, zbudowane w formie elastycznego układu, nadającego się do integracji z powierzchniami nieregularnymi jak odzież (rys. 2.5). Praca ta pokazała, że anteny oparte o sprzężenie planarno-planarne mogą skutecznie pracować w trybie czujnikowym, przy zachowaniu pełnej funkcjonalności komunikacyjnej NFC [3].



Rys. 2.5. Prototyp haftowanej anteny CPC [3]

Zaletą haftowanych anten jest ich pełna integracja z odzieżą – można je wkomponować w szew, kołnierz, rękaw, odporność na ścieranie i pranie (przy zastosowaniu odpowiednich

nici), możliwość seryjnego wytwarzania na maszynach hafciarskich. Natomiast do głównych wyzwań należy precyzyjne strojenie rezonansu anteny w warunkach tekstylnych, unikanie zwarć między zwojami (zwłaszcza przy miękkich tkaninach), zachowanie elastyczności materiału bez nadmiernego pogrubienia.

Wnioski płynące z przeglądu dostępnych konstrukcji anten wskazują, że spiralna antena planarna haftowana na podłożu tekstylnym jest rozwiązaniem optymalnym pod względem łatwości integracji z tkaniną, elastyczności i zgodności z pasmem 13,56 MHz. Z tego względu taki właśnie typ anteny przyjęto w projekcie praktycznym. W kontekście tej pracy, haftowana spiralna antena NFC będzie ważnym komponentem identyfikatora – umożliwi komunikację z telefonem użytkownika oraz zasilenie układu RF430FRL152H bez użycia baterii.

2.3.3. Komunikacja z czytnikiem w kontekście tekstyliów

Jednym z kluczowych zagadnień w konstruowaniu tekstylnych identyfikatorów RFID/NFC jest zapewnienie skutecznej i stabilnej komunikacji z czytnikiem – zarówno stacjonarnym, jak i mobilnym. W przypadku pasma HF, dominującym mechanizmem transmisji danych jest sprzężenie indukcyjne, które cechuje się wysoką czułością na odległość, orientację anteny oraz obecność materiałów pochłaniających pole magnetyczne. W kontekście tekstyliów pojawiają się dodatkowe czynniki wpływające na niezawodność transmisji, takie jak ugięcia i deformacje anteny wskutek ruchu ciała, wilgoć (pot, warunki atmosferyczne), zmienność położenia znacznika względem źródła pola (np. smartfona). Aby zapewnić stabilną komunikację, anteny tekstylne muszą być precyzyjnie dostrojone do częstotliwości rezonansowej 13,56 MHz. W tym celu projektuje się je z uwzględnieniem pojemności kompensującej, która neutralizuje wpływ zmiennych parametrów tkaniny i geometrii. Na przykład w pracy Del-Rio-Ruiz R., zastosowanie zewnętrznego kondensatora umożliwiło kompensację zmian pojemności własnej haftowanej spirali i osiągnięcie optymalnego dopasowania [6].

Odpowiednie dopasowanie impedancyjne jest kluczowe nie tylko dla zasilania układu RFID z pola czytnika, ale również dla minimalizacji strat i poprawy zasięgu komunikacji. Należy przy tym pamiętać, że anteny tekstylne często mają większe tłumienie niż sztywne odpowiedniki – m.in. z powodu wyższej rezystywności nici oraz dielektrycznych strat materiału bazowego.

Jedną z największych zalet zastosowania pasma HF i technologii NFC w systemach tekstylnych jest kompatybilność z popularnymi smartfonami. Nowoczesne urządzenia mobilne wyposażone są w zintegrowane czytniki NFC, zgodne z normami ISO/IEC 14443 oraz 15693,

co pozwala na bezpośredni odczyt danych z tekstylnego identyfikatora poprzez zbliżenie telefonu do fragmentu tkaniny zawierającego spiralną antenę.

W wielu projektach, w tym opisywanych wcześniej, smartfon pełni funkcję zarówno zasilacza (generując pole magnetyczne), jak i interfejsu użytkownika – umożliwiając odczyt danych z czujnika (np. temperatury, wilgotności, pojemności), ich wizualizację w aplikacji mobilnej, przesyłanie wyników dalej (np. do chmury lub bazy danych).

W celu zapewnienia efektywnej komunikacji istotne jest również odpowiednie umiejscowienie tekstylnego znacznika RFID. Z praktyki wynika, że najlepiej sprawdzają się miejsca o niewielkiej ekspozycji na naprężenia (np. wewnętrzna strona mankietu, kołnierzyk), lokalizacje o przewidywalnym dostępie dla czytnika (np. opaska na rękę, naszywka zewnętrzna), powierzchnie możliwie płaskie, zapewniające dobrą geometrię sprzężenia.

2.4. Czujniki pojemnościowe w elektronice ubieralnej

Czujniki pojemnościowe odgrywają istotną rolę w nowoczesnych systemach ubieralnych, umożliwiając pomiar takich parametrów jak nacisk, odkształcenie, wilgotność, pojemność skóry, objętość cieczy czy sygnały fizjologiczne. Dzięki niewielkiej złożoności, możliwości miniaturyzacji oraz niskim wymaganiom energetycznym, czujniki te idealnie nadają się do integracji z tekstyliami oraz z układami pasywnymi RFID/NFC.

2.4.1. Zasada działania i parametry czujników pojemnościowych

Czujnik pojemnościowy działa na zasadzie zmiany pojemności elektrycznej kondensatora, która następuje w odpowiedzi na zewnętrzny bodziec mechaniczny lub środowiskowy. W najprostszym ujęciu, kondensator taki składa się z dwóch elektrod (przewodzących powierzchni) oddzielonych dielektrykiem. Pojemność elektryczna C wyrażana jest równaniem:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad (2.2)$$

gdzie: ε_0 – przenikalność elektryczna próżni, ε_r – względna przenikalność dielektryka, A – powierzchnia efektywna nakładania się elektrod, d – odległość pomiędzy elektrodami.

Zjawiska, które mogą wpływać na zmianę pojemności, to zmiana odległości między elektrodami (np. nacisk, deformacja mechaniczna), zmiana powierzchni efektywnej A (np. przemieszczenie warstw), zmiana przenikalności ε_r (np. wskutek nasiąkania wilgocią lub obecności cieczy). Dzięki temu czujniki pojemnościowe mogą być wykorzystywane do

pomiaru wielu zjawisk z użyciem tej samej struktury pomiarowej, co czyni je bardzo uniwersalnymi w elektronice ubieralnej [9].

Kluczowe parametry czujników pojemnościowych:

- czułość – wyrażona jako zmiana pojemności w odpowiedzi na bodziec (np. $\Delta C / \Delta P$ dla nacisku),
- zakres pomiarowy – typowo od pojedynczych pikofaradów do kilkudziesięciu pF,
- czas odpowiedzi – od kilku milisekund do sekund (w zależności od materiału i konstrukcji),
- stabilność temperaturowa – wpływ zmian ε_r w funkcji temperatury,
- powtarzalność i histereza – szczególnie ważne w pomiarach dynamicznych (np. chodu, pracy mięśni).

Zaletą czujników pojemnościowych jest możliwość integracji z systemami RFID/NFC, ponieważ pomiar pojemności może być realizowany przez układy analogowo-cyfrowe niskiej mocy (np. FDC1004), a same czujniki mogą być wykonane z materiałów kompatybilnych z tekstyliami (folie, włókna, przede wszystkim przewodzące) [12].

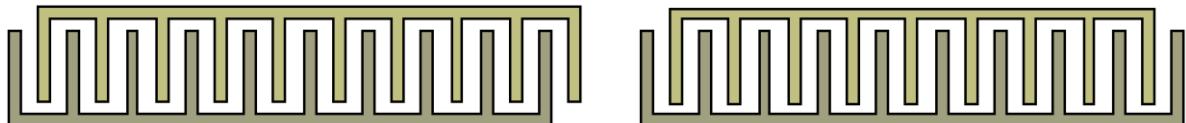
2.4.2. Przegląd technologii czujników pojemnościowych

Czujniki pojemnościowe wykorzystywane w tekstyliach mogą przyjmować różne formy konstrukcyjne, zależnie od ich przeznaczenia, typu bodźca oraz materiału bazowego. Ich budowa wpływa bezpośrednio na czułość, liniowość, zakres pomiarowy oraz podatność na integrację z tkaniną. Do najczęściej stosowanych typów należą konstrukcje warstwowe, interdigitalne oraz siatkowe, które mogą być realizowane z wykorzystaniem nici przewodzących, elastycznych dielektryków i struktur tekstylnych.

Jednym z najprostszych rozwiązań jest czujnik o geometrii równoległo-płytowej, przypominający klasyczny kondensator, w którym dwie przewodzące warstwy oddzielone są elastycznym dielektrykiem. Zmiana nacisku prowadzi do zmniejszenia odległości pomiędzy elektrodami, a tym samym do zwiększenia pojemności. Tego rodzaju konstrukcja pozwala na uzyskanie wysokiej czułości i dobrej liniowości odpowiedzi, lecz bywa mniej elastyczna i trudniejsza do miniaturyzacji w zastosowaniach ubieralnych. Czujniki tego typu mogą być wykonywane metodą warstwowego laminowania lub haftu, co pozwala na ich integrację z elastycznym podłożem tekstylnym, przy zachowaniu podstawowych właściwości funkcjonalnych materiału bazowego. W literaturze opisano wiele rozwiązań wykorzystujących tego rodzaju geometrię do pomiaru nacisku, odkształcenia mechanicznego lub sygnałów

pochodzących z powierzchni skóry, w tym także na powierzchni protez czy wkładek ortopedycznych [8].

Innym powszechnie stosowanym rozwiązaniem są czujniki interdigitalne, nazywane również grzebieniowymi. W ich konstrukcji wykorzystywane są naprzemiennie rozmieszczone elektrody w jednej płaszczyźnie, przypominające zazębajające się palce (rys. 2.6).

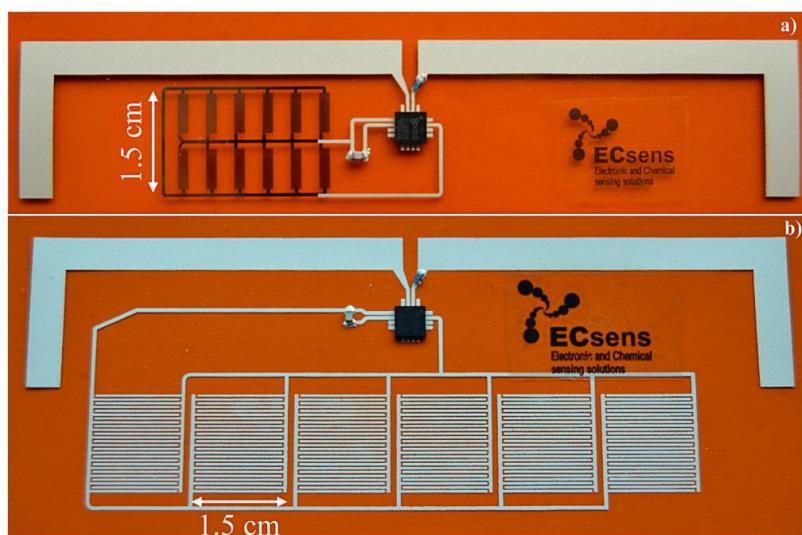


Rys. 2.6. Przykład elementu niesymetrycznego (po lewej) i symetrycznego [13]

Zmiana pojemności w tego typu strukturze następuje wskutek zmiany właściwości dielektrycznych przestrzeni pomiędzy elektrodami lub ich wzajemnego przesunięcia. Struktury tego typu znajdują szerokie zastosowanie m.in. w pomiarze obecności cieczy, wilgoci, a także w zastosowaniach zbliżeniowych.

W pracy K. Smółki przedstawiono modele matematyczne opisujące zachowanie mikrostruktur grzebieniowych wykorzystywanych w mikroaktuatorach. Modele te uwzględniają zarówno geometrię układu, jak i zależność pojemności od parametrów takich jak długość zębów, odstępy między nimi oraz liczba par elektrod. Analiza wykazała, że czujniki interdigitalne są szczególnie czułe na przemieszczenia wzdłuż osi elektrod oraz zmiany otaczającego środowiska, co czyni je użytecznymi w pomiarze wilgotności lub obecności dielektryka w przestrzeni międzyelektrodowej [13].

Opisane modele znajdują zastosowanie także przy projektowaniu tekstylnych struktur grzebieniowych nanoszonych na tkaniny techniką haftu lub nadruku (rys. 2.7).

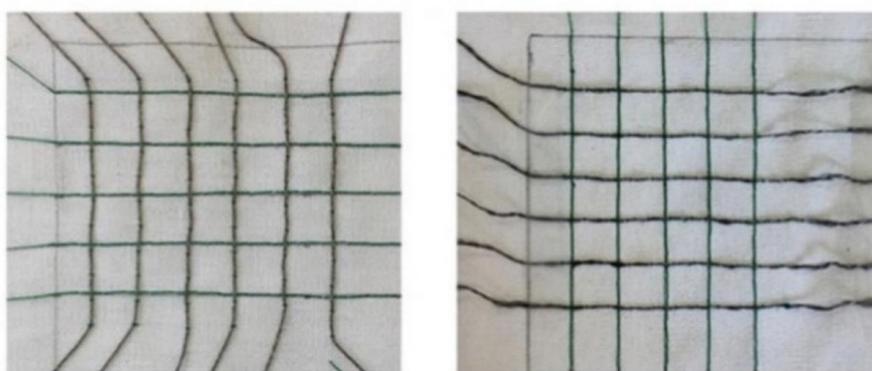


Rys. 2.7. Identyfikator RFID z wydrukowanymi czujnikami [14]

Zastosowanie tego typu czujników zostało wykorzystane w pracy Salmerón J.F. Przedstawiono pasywne znaczniki RFID UHF, które umożliwiają pomiar temperatury i wilgotności. Znaczniki te zostały wykonane metodą druku na elastycznym podłożu poliamidowym Kapton HN i są zgodne ze standardem EPC Gen 2. Do ich działania wykorzystano układ RFID SL900A firmy AMS AG, który posiada wbudowany czujnik temperatury oraz interfejs do obsługi czujników wilgotności.

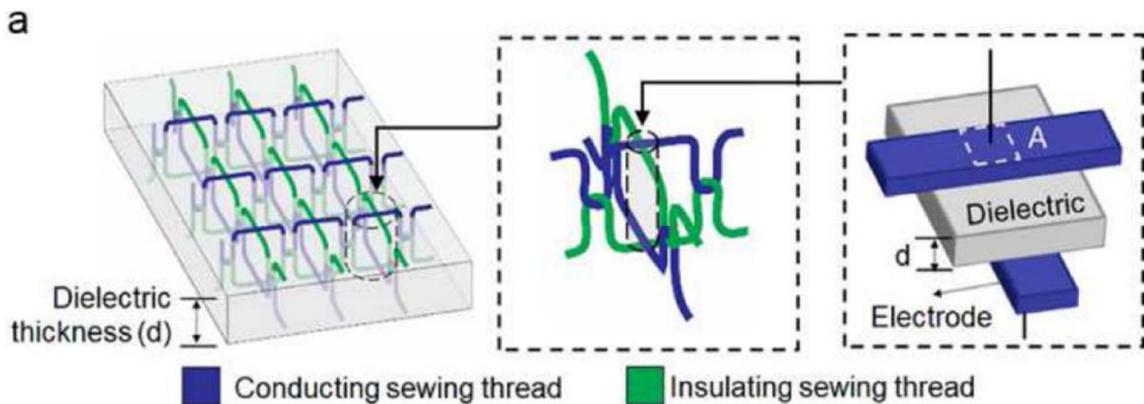
Wilgotność mierzona jest za pomocą dwóch rodzajów czujników pojemnościowych. Czujnik serpentynowy (SRE), wykonany metodą druku atramentowego, charakteryzuje się większą czułością, natomiast czujnik interdigowany (IDE), wytwarzany metodą sitodruku, jest łatwiejszy w produkcji, lecz wymaga większej powierzchni. Dodatkowo zastosowano obwód dopasowujący impedancję, składający się z elementu indukcyjnego SMD o wartości 51 nH oraz zewnętrznego kondensatora odniesienia o pojemności 33 pF dla struktury SRE i 39 pF dla struktury IDE. Oba typy znaczników zostały przetestowane w zakresie wilgotności od 10 do 98 procent oraz temperatury od 10 do 95 stopni Celsjusza. Czujnik serpentynowy wykazywał czułość 100 fF na procent wilgotności i pokrywał zakres od 37 do 70 procent wilgotności względnej. Czujnik interdigowany charakteryzował się czułością 54 fF na procent wilgotności i mierzył wilgotność w zakresie od 60 do 90 procent. Maksymalna odległość odczytu znacznika wynosiła 1,6 metra, podczas gdy teoretyczna wartość obliczona na podstawie modelu propagacyjnego wskazywała na 2,2 metra. Rozwiązanie to może znaleźć zastosowanie w monitorowaniu warunków środowiskowych, łańcuchach dostaw, inteligentnych opakowaniach oraz systemach Internetu Rzeczy [14].

Trzecią grupę stanowią czujniki siatkowe lub włókniste, w których przewodzące przedze są wplecone w strukturę tkaniny tak, by utworzyć wzajemnie przesunięte warstwy elektrody (rys. 2.8).



Rys. 2.8. Sieć czujników wykonana ze srebrnych nici [15]

Dielektryk stanowi w tym przypadku najczęściej warstwa włókniny, pianki lub elastomeru, umieszczona pomiędzy przewodzącymi włóknami (rys. 2.9).



Rys. 2.9. Schemat czujnika pokazujący równoległy kondensator płytowy [15]

Tego rodzaju czujniki wykazują wysoką zgodność z naturalnymi właściwościami tkanin, w tym elastycznością i przepuszczalnością powietrza. Są one szczególnie przydatne w pomiarach nacisku i odkształcenia dynamicznego, np. podczas ruchu ciała użytkownika, a ich dużą zaletą jest możliwość pokrycia nimi dużych powierzchni odzieży [15].

W nowszych pracach badawczych pojawiają się również struktury o zróżnicowanej gęstości dielektryka lub konstrukcji gradientowej, w których czułość i zakres pomiarowy są regulowane poprzez odpowiednie ukształtowanie geometrii lub warstw czujnika. Czujniki takie są szczególnie przydatne w zastosowaniach wymagających wysokiej dokładności oraz odporności na zmienne warunki środowiskowe.

Analiza różnych geometrii czujników pojemnościowych (interdigitalnych, warstwowych) pozwoliła na wybór układu spiralnego i grzebieniowego do dalszych badań. Szczególnie konstrukcje grzebieniowe wykazały wysoką czułość w warunkach zmiennej wilgotności, co uzasadnia ich użycie w projekcie.

2.4.3. Integracja z tekstyliami – haft, materiały, przetworniki

Integracja czujników pojemnościowych z materiałami tekstylnymi stanowi jeden z kluczowych obszarów rozwoju współczesnej tektroniki. W odróżnieniu od klasycznych rozwiązań elektronicznych montowanych na sztywnych podłożach, systemy ubieralne wymagają komponentów elastycznych, cienkich, odpornych na zginanie, a jednocześnie zapewniających odpowiednie właściwości elektryczne. Podczas projektowania czujników zintegrowanych z tekstyliami należy zatem zwrócić uwagę zarówno aspekty technologiczne, jak i użytkowe.

Jedną z najczęściej stosowanych metod wytwarzania tekstylnych czujników pojemnościowych jest haft przewodzącą nicią. Elektrody kondensatora formowane są w tym przypadku z przewodzących przędz, np. pokrytych srebrem, które wyszywane są w odpowiedni sposób na warstwie bazowej. Przebieg haftu może mieć formę równoległych linii, struktur krzyżowych lub spiralnych. Między warstwami przewodzącymi umieszczany jest dielektryk tekstylny, np. włóknina typu non-woven, pianka poliuretanowa lub elastyczny elastomer. W literaturze opisano struktury, w których stosowano elastomery termoplastyczne o stabilnej przenikalności elektrycznej oraz niskiej chłonności wilgoci. Do wykonania elektrod stosowano przędze srebrzone, łączące przewodnictwo z wysoką elastycznością. Przedże te wykazują niską rezystancję i są dostosowane do obróbki maszynowej, co umożliwia produkcję seryjną na maszynach hafciarskich. Czujniki tworzone tą metodą były testowane między innymi w protezach kończyn dolnych, gdzie monitorowano rozkład nacisku w czasie chodu. Wyniki wykazały, że system działał niezawodnie w warunkach dynamicznych i był odporny na zginanie oraz zawilgocenie [8].

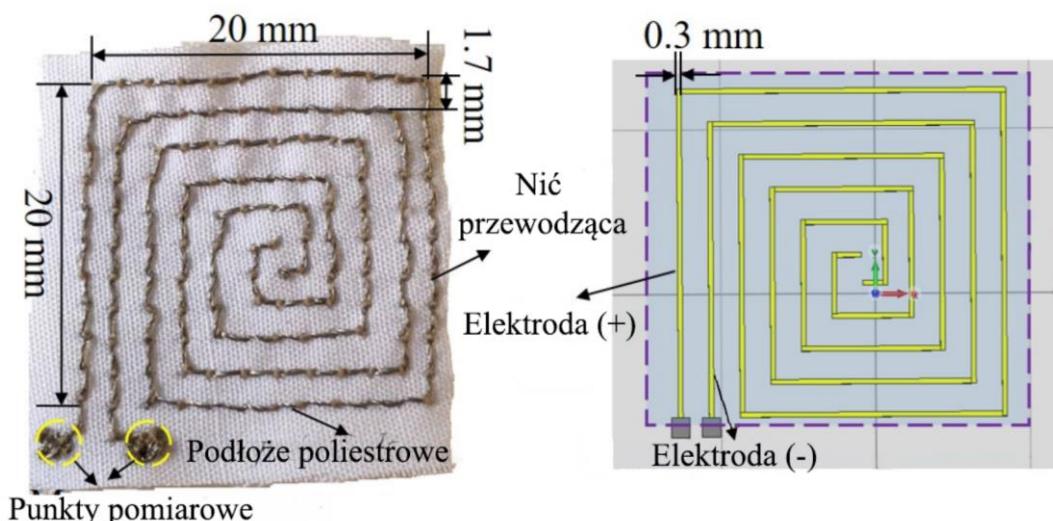
Innym podejściem do integracji czujników pojemnościowych z tekstyliami jest wykorzystanie geometrii interdigitalnej, w której elektrody przypominają zazębające się palce. W strukturze tego typu zmiana pojemności zachodzi wskutek zmiany właściwości dielektrycznych otoczenia lub przemieszczenia materiału między elektrodami. Modele matematyczne opisujące tego rodzaju struktury zaprezentowane zostały przez K. Smółkę, który na ich podstawie przedstawił analityczne i polowe wyznaczenia rozkładów pola oraz pojemności. Zależności te uwzględniają parametry geometryczne układu, takie jak szerokość, wysokość i rozmieszczenie elektrod. Opisane struktury grzebieniowe są szczególnie czułe na przemieszczenia wzdłuż osi układu, co czyni je przydatnymi w pomiarze nacisku, odkształceń lub obecności cieczy w przestrzeni dielektrycznej [13].

Integracja przetworników pojemnościowych z tekstyliami wymaga także uwzględnienia właściwości materiałów bazowych. Najczęściej stosowane tkaniny to flanela, mieszanki poliestrowo-bawełniane, pianki dielektryczne o strukturze porowej lub włókniny techniczne. Materiały te pełnią funkcję warstwy separującej elektrody, a ich właściwości dielektryczne mają bezpośredni wpływ na wartość pojemności i czułość czujnika. Dobór materiału dielektrycznego musi uwzględniać stabilność przenikalności elektrycznej, odporność na wilgoć oraz elastyczność mechaniczną. Z technicznego punktu widzenia, ważne jest również odpowiednie połączenie tekstylnego czujnika z układem pomiarowym.

2.4.4. Przegląd rozwiązań tekstylnych czujników pojemnościowych

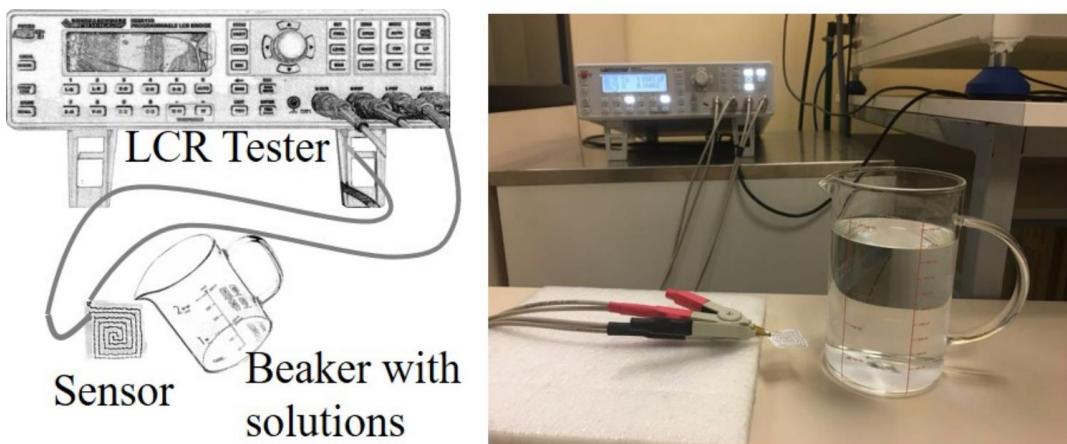
W ostatnich latach opracowano wiele tekstylnych czujników pojemnościowych, których konstrukcja i zastosowanie są dostosowane do wymagań systemów ubieralnych, rehabilitacyjnych i środowiskowych. Kluczową cechą wspólną tych rozwiązań jest integracja układów pomiarowych z elastycznymi, przewiewnymi i lekkimi materiałami włókienniczymi, co pozwala na tworzenie wygodnych i funkcjonalnych systemów do ciągłego monitorowania parametrów otoczenia lub ciała użytkownika.

Jednym z ciekawszych przykładów jest haftowany czujnik pojemnościowy opracowany przez Luo C. i współpracowników, zaprojektowany do detekcji roztworów cukru. W konstrukcji tej wykorzystano dwie warstwy tkaniny przewodzącej wyszytej srebrzoną nicią, rozdzielone cienką tkaniną izolacyjną (rys. 2.10).



Rys. 2.10. Haftowany czujnik pojemnościowy oraz jego model [5]

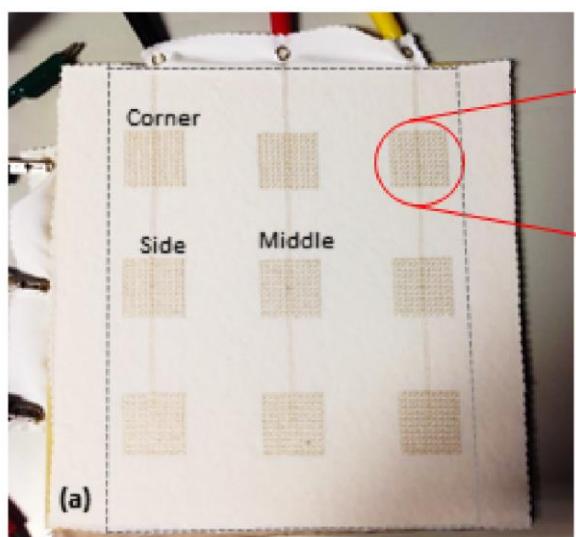
Czujnik został osadzony w pojemniku do badania właściwości dielektrycznych cieczy, a zmiana ich stężenia wpływała na wartość pojemności mierzona przez układ (rys. 2.11).



Rys. 2.11. Zdjęcie konfiguracji pomiarowej [5]

Rozwiązań to cechowało się wysoką powtarzalnością, niską histerezą oraz odpornością na zakłócenia środowiskowe. Autorzy zwracali uwagę na dużą przydatność takich struktur do detekcji obecności substancji w warunkach rzeczywistych, także w systemach medycznych i diagnostycznych [5].

W innym projekcie, zrealizowanym przez H. Gleskovą i współpracowników, stworzono całkowicie tekstylny czujnik pojemnościowy w formie macierzy elektrod osadzonych w oparciu o techniki warstwowe i haft (rys. 2.12).



Rys. 2.12. Widok z góry elektrody tekstylnej wykonanej ze wzorów gwiazdkowych [15]

Celem badania było opracowanie tekstylnego systemu monitorowania obecności i rozkładu masy użytkownika siedzącego na krześle. Czujnik wykonano z przewodzących tkanin, a warstwę dielektryczną stanowiła kompresowalna pianka tekstylna. Struktura została zintegrowana z materiałem tapicerskim i podłączona do niskomocowego układu pomiarowego.

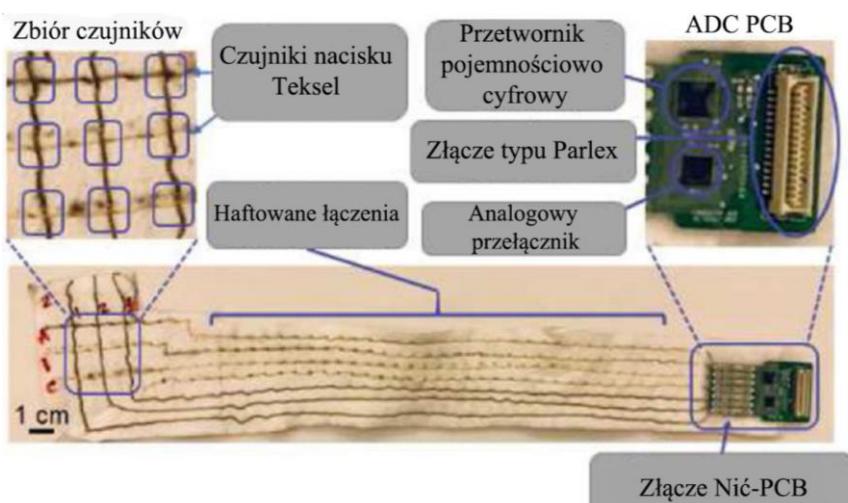
Uzyskane dane pozwalały nie tylko na wykrycie obecności użytkownika, ale także na określenie jego pozycji, co może mieć znaczenie w rehabilitacji lub interakcji z inteligentnym otoczeniem [15].

Warto również wspomnieć o przykładach tekstylnych czujników pojemnościowych przeznaczonych do monitorowania nacisku w protezach kończyn dolnych. W pracy Tabor J. i współautorów zaprezentowano w pełni tekstylny system sensorów pojemnościowych, zaprojektowany z myślą o integracji z wyściółką protez (rys. 2.13). Czujnik wykonano poprzez prostopadłe zszycie nici przewodzących i izolacyjnych, tworząc macierz „texeli” na podłożu tekstylnym.



Rys. 2.13. Płytki PCB do gromadzenia danych z matrycami czujników oraz czujnik SLS [8]

Jako elektrody zastosowano przedzę srebrzoną, a warstwę dielektryczną stanowiła włóknina na bazie kopolimeru SEBS. Cały system został zintegrowany z układami konwersji analogowo-cyfrowej, umożliwiającymi szybkie i energooszczędne zbieranie danych z wielu sensorów (rys. 2.14).



Rys. 2.14. Układy czujników, połączenia i układ ADC [8]

Czujnik był testowany zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i w warunkach rzeczywistych – na kończynie fantomowej, u osoby zdrowej oraz u pacjenta po amputacji. Wyniki wykazały wysoką stabilność działania, zdolność wykrywania zmian rozkładu nacisku oraz odporność na zakłócenia elektromagnetyczne. System okazał się również komfortowy w noszeniu i możliwy do wbudowania w istniejące komponenty protez, co potwierdza jego potencjał do zastosowań klinicznych [8].

Opisane rozwiązania wskazują na szerokie możliwości implementacji czujników pojemnościowych w tekstyliach. Kluczowym czynnikiem warunkującym skuteczność takich systemów jest odpowiedni dobór materiałów oraz przemyślana geometria elektrod, zapewniająca pożądane właściwości elektryczne, odporność mechaniczną i stabilność działania w czasie. Rozwiązania haftowanych czujników i anten wskazują na ich dużą trwałość i odporność na zginanie. Na tej podstawie przyjęto, że wykonane haftu na materiale PES/CO będzie właściwym wyborem – zarówno pod względem technologicznym, jak i użytkowym – do zastosowania w projekcie identyfikatora RFID.

2.5. Podsumowanie

Część teoretyczna dostarczyła podstaw do zaprojektowania tekstylnego identyfikatora RFID z funkcją sensoryczną. Szczegółowe informacje dotyczące anten spiralnych, przewodzących przedz, standardów komunikacji NFC oraz czujników pojemnościowych zostały bezpośrednio wykorzystane w procesie projektowania, a ich dobór został uwarunkowany zarówno wymaganiami technologicznymi, jak i praktycznymi wskazówkami płynącymi z literatury.

3. Część praktyczna

W ramach realizacji części praktycznej zaplanowano wykonanie bezprzewodowego, pasywnego czujnika pojemnościowego opartego na układzie scalonym RF430FRL152H firmy Texas Instruments. Główną ideą projektu było opracowanie układu zdolnego do pomiaru pojemności z wykorzystaniem przetwornika analogowo-cyfrowego, a następnie przekazania wyniku pomiaru do urządzenia zewnętrznego (np. smartfona) za pomocą interfejsu komunikacji NFC. W trakcie prac napotkano szereg trudności, w tym związanych z procesem lutowania układów scalonych w obudowie VQFN, problemami rezonansowymi anteny oraz doborem wartości kondensatorów dopasowujących.

W niniejszym rozdziale przedstawione zostaną: proces projektowania układu, anteny oraz czujnika, implementacja oprogramowania (ang. *firmware*), testowanie i weryfikacja poprawności działania układu oraz analiza otrzymanych wyników.

Zdefiniowano następujące założenia funkcjonalne układu pomiarowego, obejmujące:

- brak zewnętrznego źródła zasilania (pasywna praca układu),
- zdolność do pomiaru pojemności przy wykorzystaniu czujnika tekstylnego,
- możliwość odbioru danych przez standardowe urządzenia mobilne z funkcją NFC.

Układ RF430FRL152H łączy rdzeń mikrokontrolera MSP430 o bardzo niskim poborze mocy z bezprzewodową komunikacją radiową zgodną ze standardem ISO15693. Wbudowany w strukturę układu 14-bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy typu Sigma-Delta (SD14) charakteryzuje się bardzo niskim prądem wejściowym, niskim poziomem szumów oraz niewielkim napięciem offsetu. Pozwala on na akwizycję sygnałów z trzech zewnętrznych źródeł analogowych, jak również z zintegrowanego czujnika temperatury.

Oprócz wejść analogowych, układ udostępnia interfejs SPI/I²C, który może zostać skonfigurowany zarówno do obsługi cyfrowych czujników peryferyjnych, jak i do integracji z systemem nadzorżennym (hostem). Istotną cechą RF430FRL15xH jest obecność pamięci mask ROM, w której znajduje się gotowy stos komunikacyjny do obsługi transmisji NFC. W pamięci tej umieszczono również kod aplikacyjny odpowiedzialny za pomiary, z możliwością konfiguracji takich parametrów jak częstotliwość próbkowania, progi alarmowe oraz warunki aktywacji. Dodatkowo, układ zawiera 2 kB nieulotnej pamięci FRAM, przeznaczonej zarówno do przechowywania danych pomiarowych, jak i do rozbudowy lub modyfikacji kodu aplikacyjnego, co jest szczególnie istotne w kontekście współpracy z czujnikami cyfrowymi wymagającymi indywidualnych protokołów komunikacyjnych.

W zakresie zasilania RF430FRL15xH oferuje dużą elastyczność – może pracować w trybie bezbateryjnym, pozyskując energię z pola elektromagnetycznego generowanego przez zbliżony czytnik NFC, lub zostać zasilony z zewnętrznej baterii 1,5 V, co rozszerza zakres zastosowań układu w aplikacjach pomiarowych i mobilnych.

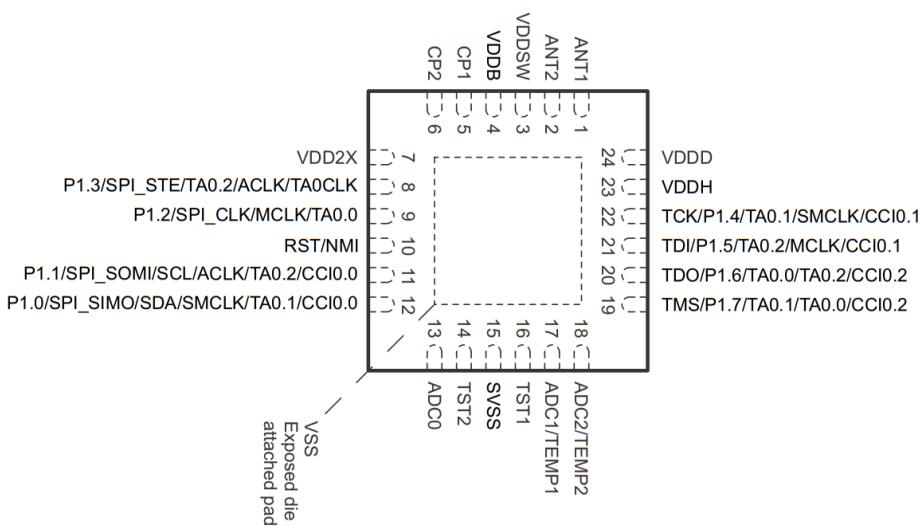
3.1. Projektowanie układu

Założenie stworzenia możliwie najprostszego i najmniejszego układu z wykorzystaniem wbudowanego przetwornika ADC w układzie RF430FRL152H do realizacji pomiarów pojemności wyhaftowanych czujników tekstylnych jest nieosiągalne. Rozwiązanie to nie zapewnia wiarygodności i precyzji pomiarowej dla tego typu aplikacji. Dlatego też zdecydowano się na rozbudowanie układu o dedykowany przetwornik FDC1004.

3.1.1. Część sprzętowa

Na potrzeby wstępnej analizy bilansu napięć i możliwości układu wykorzystano schemat oparty na otwartym repozytorium GoodTag v11, udostępnionym publicznie na platformie GitHub przez społeczność specjalizującą się w inżynierii odwrotnej układów NFC [16]. Projekt ten oparto na zaleceniach projektowych zawartych w rozdziale 7. dokumentacji układu RF430FRL152H przez producenta Texas Instruments [17].

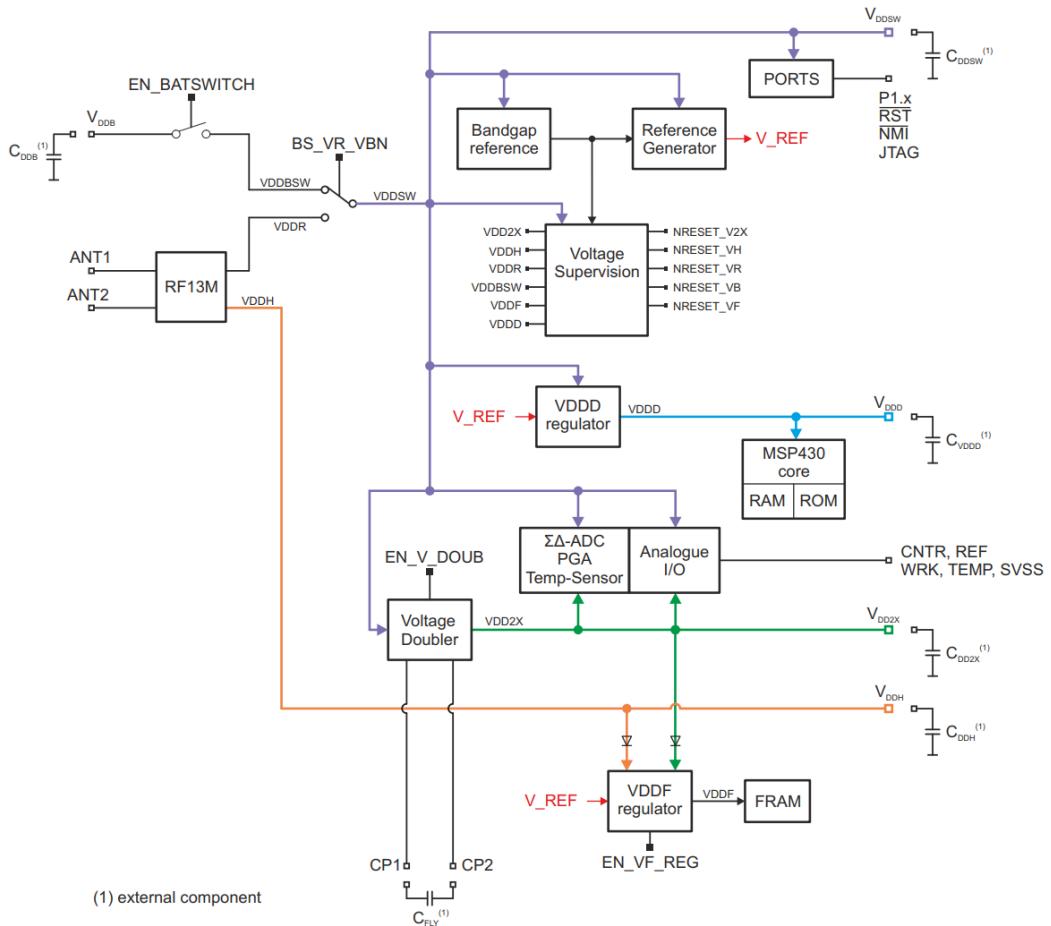
Na rysunku 3.1 przedstawiono wyprowadzenia tego transpondera.



Rys. 3.1. Schemat wyprowadzeń z układu transpondera

Do wyprowadzenia VDDH doprowadzono linie zasilania z wyjścia prostownika RF wewnątrz chipu a do wyprowadzenia SVSS podłączono wspólną masę układu co ukazano na

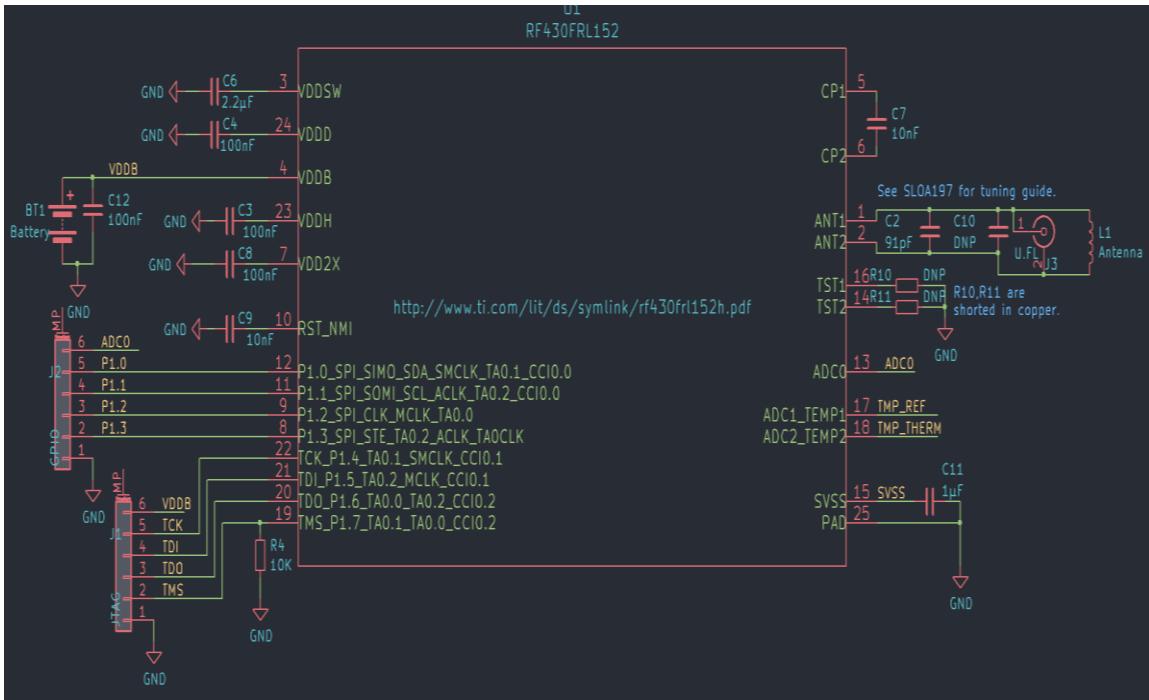
rysunku 3.2 diagramu modułu zarządzania zasilaniem RFPMM (ang. *Radio-Frequency Power Management Module*).



Rys. 3.2. Diagram modułu RFPMM

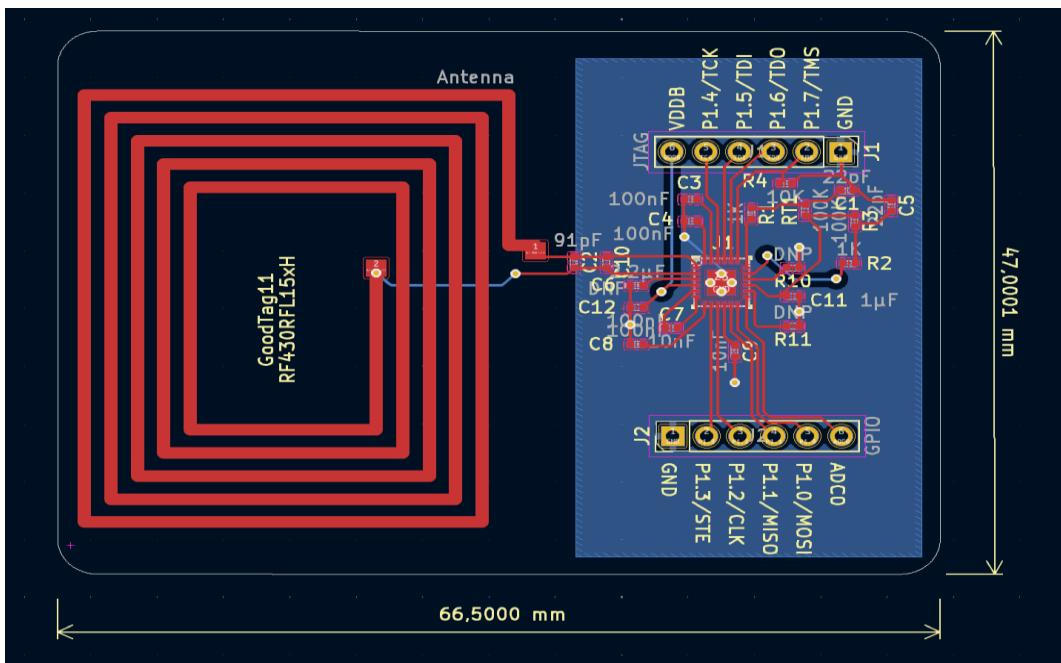
Na wejściu antenowym (ANT1 i ANT2) wbudowana została antena PCB o indukcyjności około $1,07 \mu\text{H}$, z dołączonymi równolegle kondensatorami ceramicznymi (92 pF + pojemność wew. chipa ok. 35 pF) w celu uzyskania rezonansu przy częstotliwości $13,56 \text{ MHz}$.

Dodatkowo na schemacie przewidziano miejsce na rezystory i kondensatory do odsprzęgania zasilania, a także złącza testowe umożliwiające programowanie układu poprzez interfejs Spy-Bi-Wire (SBW) z wykorzystaniem płytka programatora MSP430 LaunchPad (rys. 3.3).



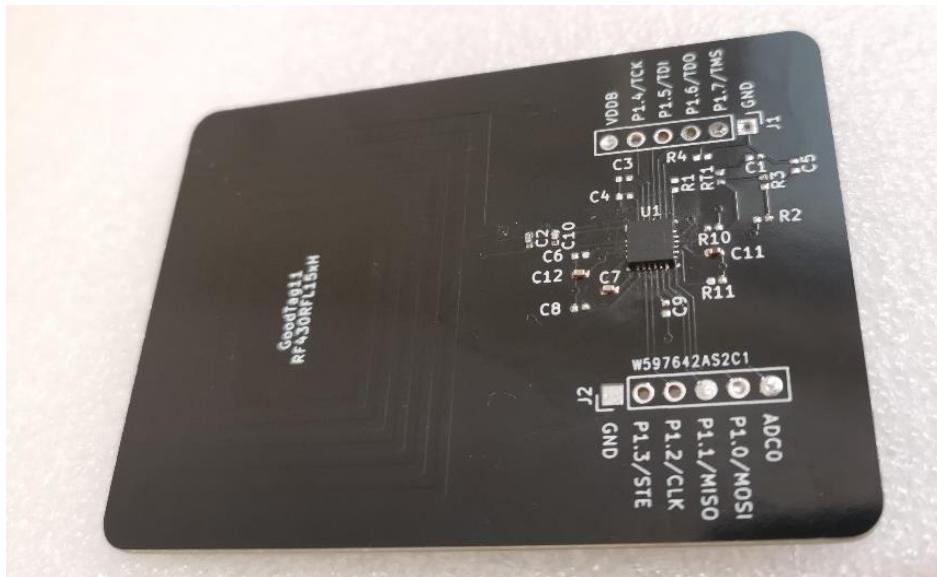
Rys. 3.3. Schemat płytki ewaluacyjnej [16]

Układ został zaprojektowany jako dwuwarstwowa płytka drukowana o kompaktowych wymiarach, przystosowana do pasywnej pracy zasilanej wyłącznie z pola elektromagnetycznego generowanego przez urządzenie odczytujące (rys. 3.4). Projekt płytki PCB został wykonany w oprogramowaniu KiCad, wyprodukowany metodą zamówienia zewnętrznego i ręcznie polutowany przy pomocy stacji lutowniczej oraz spoiwa lutowniczego Sn60Pb36Ag2.



Rys. 3.4. Widok projektu PCB

Na płytce umieszczono układ RF430FRL152H w obudowie VQFN-32, który pełni rolę głównego kontrolera, przetwornika analogowo-cyfrowego oraz interfejsu komunikacyjnego NFC (rys. 3.5). W trakcie prac odnotowano istotną wrażliwość układu scalonego na zbyt wysokie temperatury, czas ekspozycji cieplnej oraz wyładowania elektrostatyczne, co skutkowało uszkodzeniem kilku egzemplarzy w procesie prototypowania.



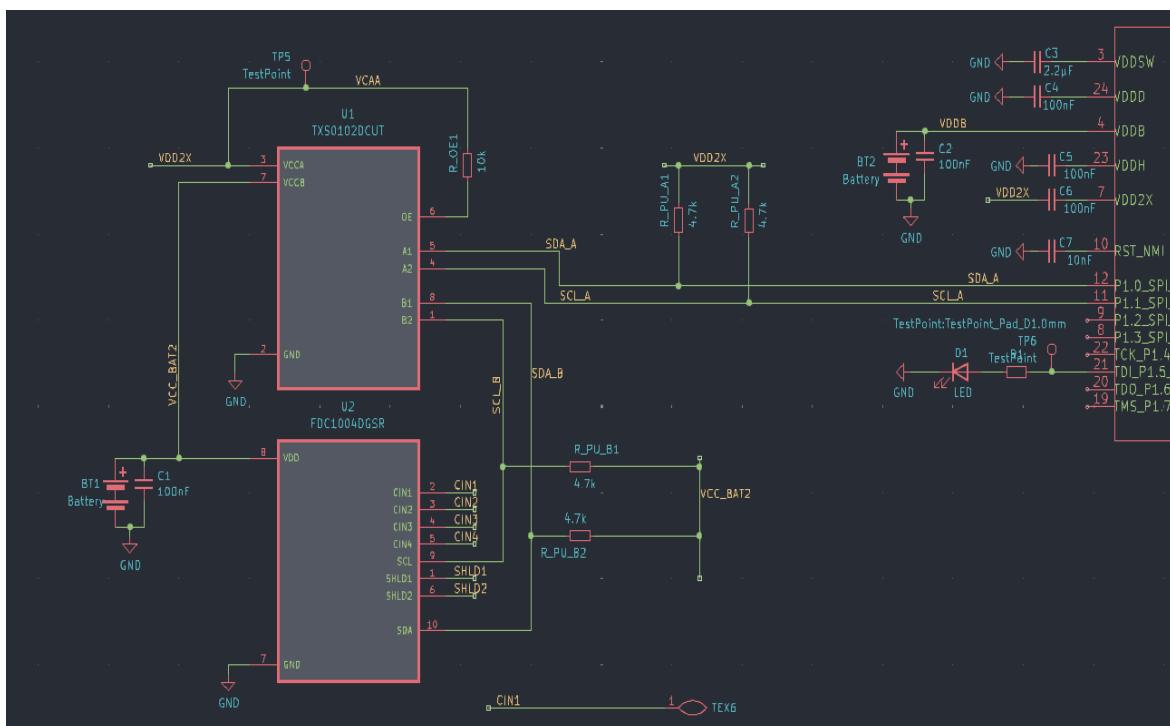
Rys. 3.5. Gotowa płytka rozwojowa z zamontowanymi elementami

W dalszej części pracy przystąpiono do wstępnej implementacji oprogramowania układowego oraz przeprowadzono testy mające na celu weryfikację poprawności działania układu pomiarowego. W warunkach zasilania wyłącznie z pola NFC (bez baterii), na wyprowadzeniu V_{DDSW} uzyskiwano napięcie rzędu 1,55 V, co zgodnie z dokumentacją (zakres 1,4–1,65 V) umożliwia poprawną pracę wszystkich wewnętrznych regulatorów. Pomysłem było zasilenie cyfrowego czujnika z wyjścia mnożnika napięcia V_{DD2X} układu RF430RFL152H, które generuje podwojone napięcie zasilania V_{DDSW} w trybie *energy harvesting*. Zmierzono wartość napięcia na tym wyjściu podczas zasilania z polem NFC i wykazano wartość maksymalną około 2,5 V. Niestety, wartość ta może być niewystarczająca do poprawnego zasilenia układu FDC1004, który zgodnie z dokumentacją techniczną wymaga napięcia co najmniej 2,7 V. Zmusiło to do zastosowania dodatkowego układu regulatora napięcia oraz bufora/konwertera poziomów logicznych I²C spowodowaną różnicą napięć zasilania pomiędzy RF430RFL152H (1,5 V) a FDC1004 (3,0 V) - przy zasilaniu układu z baterii 3 V. Przy takim rozwiązaniu implikuje się problem braku funkcji wyłączenia zasilania przez interfejs I²C lub wejściem EN, którego FDC1004 nie posiada, przez co po podłączeniu napięcia zasilającego układ pozostanie w trybie aktywnym. Zmusza to do zastosowania

dodatkowego elementu przełączającego (np. tranzystora), który umożliwiłby fizyczne odłączanie zasilania czujnika poza momentami pomiaru. Jednakże układ zostałby rozbudowany o kolejne elementy, co nie jest zgodne z założeniami projektowymi.

Ostatecznie podjęto próbę konstrukcji układu pomiarowego wykorzystując wcześniejszy układ RF430RFL152H, przetwornik pojemnościowo-cyfrowy FDC1004DGSR, który zapewnia wysoką dokładność i stabilność pomiaru oraz liczbę kanałów. Pośrednikiem między tymi układami jest dwukierunkowy przetwornik poziomów logicznych TXS0102DCUT.

Wykonano schemat układu (rys. 3.6) oraz projekt płytki PCB.



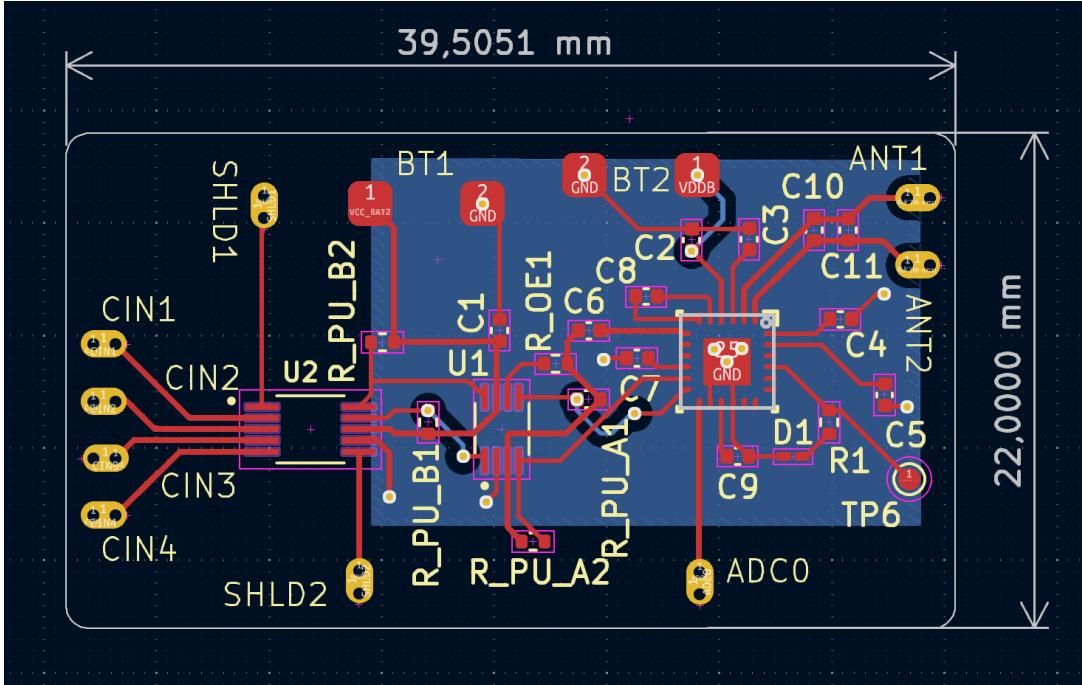
Rys. 3.6. Schemat rozbudowanego układu

Wyprowadzenie płytka również zlecono firmie zewnętrznej. Zdecydowano się na dwa rodzaje podłoża:

- standardowe: dwuwarstwowe, FR-4 o grubości 1,6 mm (rys. 3.7);
- elastyczne: dwuwarstwowe, o grubości 25 µm.

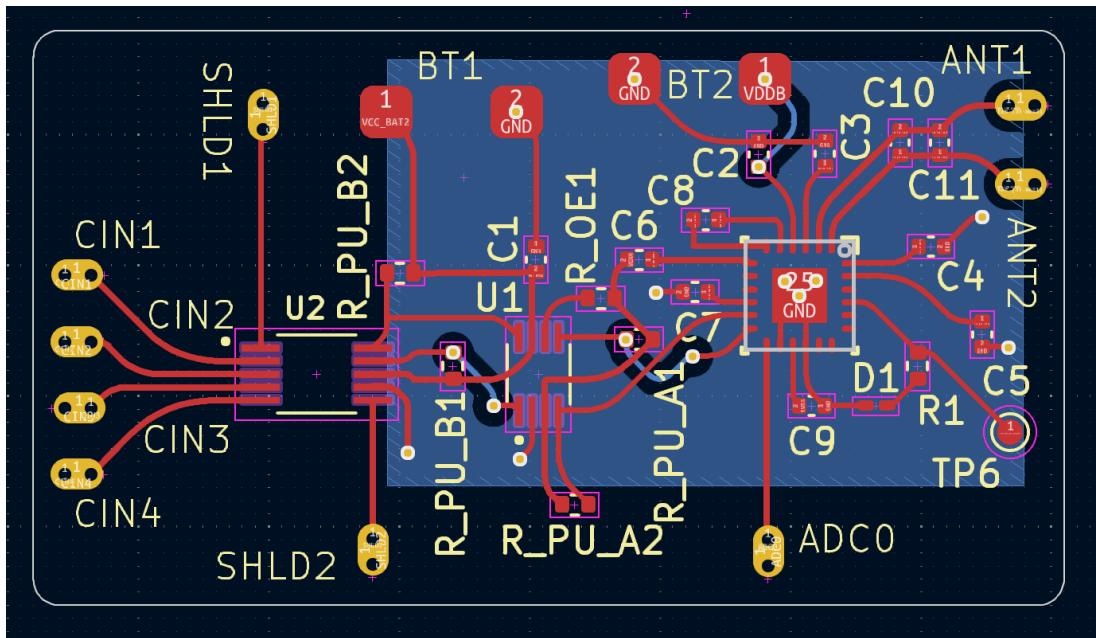
W projekcie zadbano o kompatybilne złącza, które umożliwiają podłączenie nici przewodzących łączących antenę oraz czujnik przez przewleczenie. Starano się zachować niewielkie odległości i długości ścieżek między elementami w celu wyeliminowania możliwie dużego wpływu pojemności pasożytniczych oraz zakłóceń. Dodano diodę typu LED w celu

weryfikacji i debugowania pracy układu ze względu na brak dedykowanego debuggera MSP-FET.



Rys. 3.7. Projekt płytki PCB rozbudowanego układu

Ścieżki wersji elastycznej płytka poddano narzędziu zaokrąglającemu je w celu zachowania zwiększenia trwałości ścieżek na urazy mechaniczne (rys. 3.8).

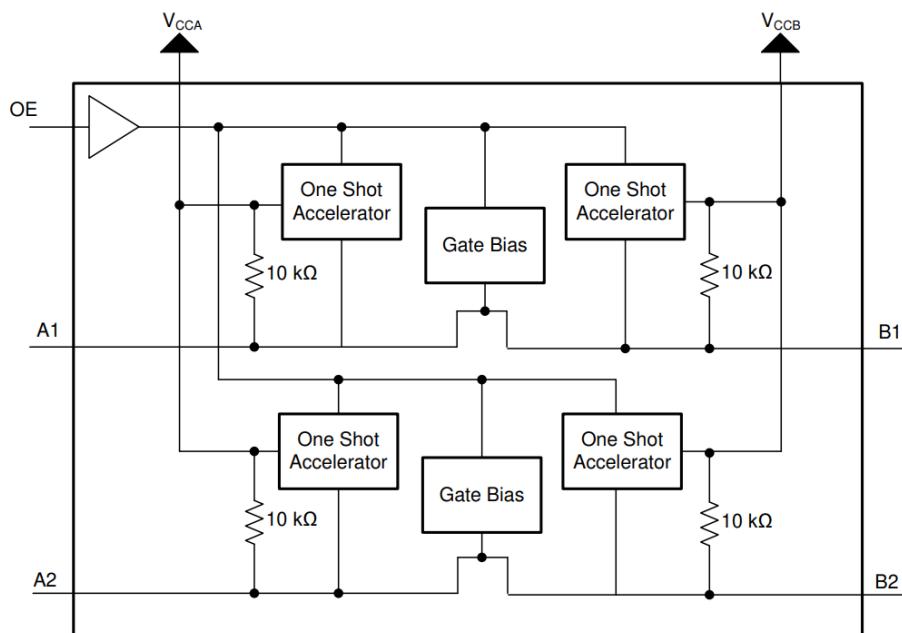


Rys. 3.8. Projekt płytki PCB z zaokrąglonymi ścieżkami

Konwerter TXS0102 został zasilony zgodnie z wymaganiami producenta: napięcie VCCA podano z linii VDD2X mikrokontrolera (ok. 2,25 V), natomiast napięcie

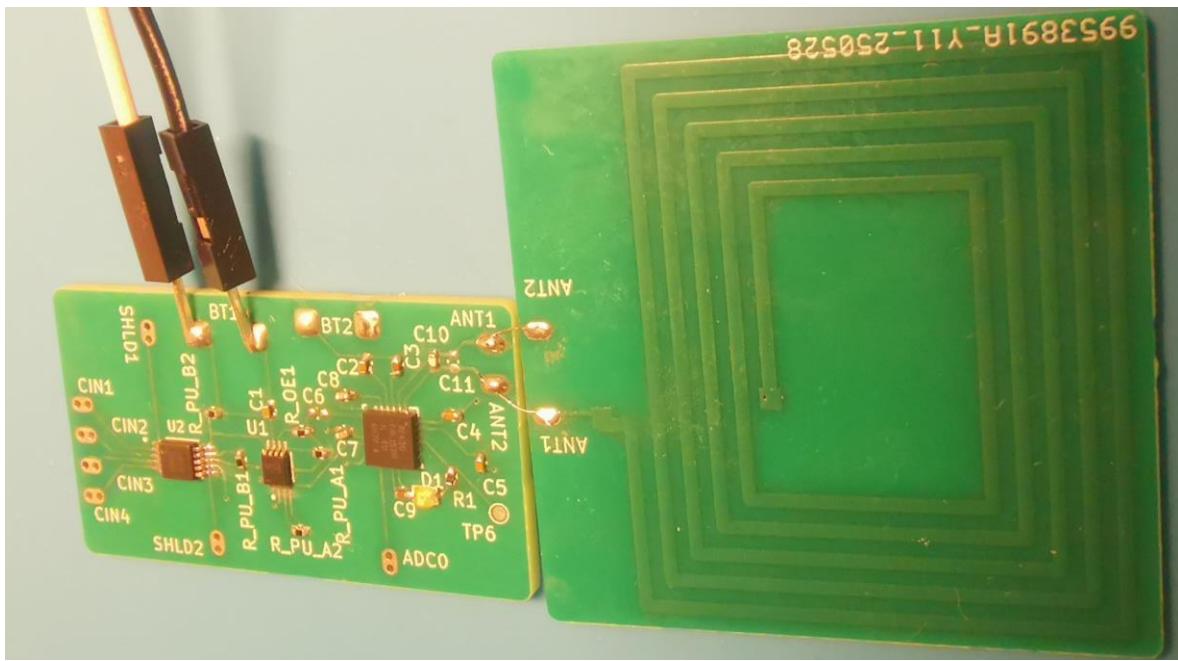
VCCB – z baterii CR2016 (3,0 V) współdzielonej z układem FDC1004. Stan aktywności konwertera kontrolowany był sygnałem OE (Output Enable; aktywacja stanem wysokim), który automatycznie przełączał wejścia i wyjścia w tryb wysokiej impedancji (High-Z) w przypadku zaniku zasilania lini VDD2X po stronie mikrokontrolera. Pomiar napięcia na liniach SDA i SCL potwierdził obecność prawidłowych poziomów logicznych po obu stronach konwertera. Po stronie RF430 zaobserwowano napięcia w zakresie 1,85–1,95 V, natomiast po stronie FDC1004 napięcia wynosiły około 2,95–3,0 V.

Dodatkowo dokonano pomiaru prądu pobieranego przez FDC1004 w stanie aktywnym. Zarejestrowano wartość rzędu $25 \mu\text{A}$, co jest zgodne z przewidywaniami dla stanu bezczynności tego układu. Oznaczało to, że czujnik jest prawidłowo zasilany i gotowy do działania. Weryfikowano także obecność rezystorów podciągających (pull-up) na liniach I²C. Zgodnie z dokumentacją TXS0102, układ ten posiada wewnętrzne rezystory podciągające o wartości $10 \text{ k}\Omega$ dla każdej linii SDA i SCL, co w wielu przypadkach pozwala na rezygnację z zewnętrznych rezystorów (rys. 3.9).



Rys. 3.9. Schemat blokowy układu TXS0102 [17]

Niemniej jednak w ramach testów dodano zewnętrzne rezystory $4,7 \text{ k}\Omega$ do linii danych i zegara – zarówno po stronie A, jak i B – celem poprawy integralności sygnału (rys. 3.10).



Rys. 3.10. Gotowy układ z dołączoną anteną PCB

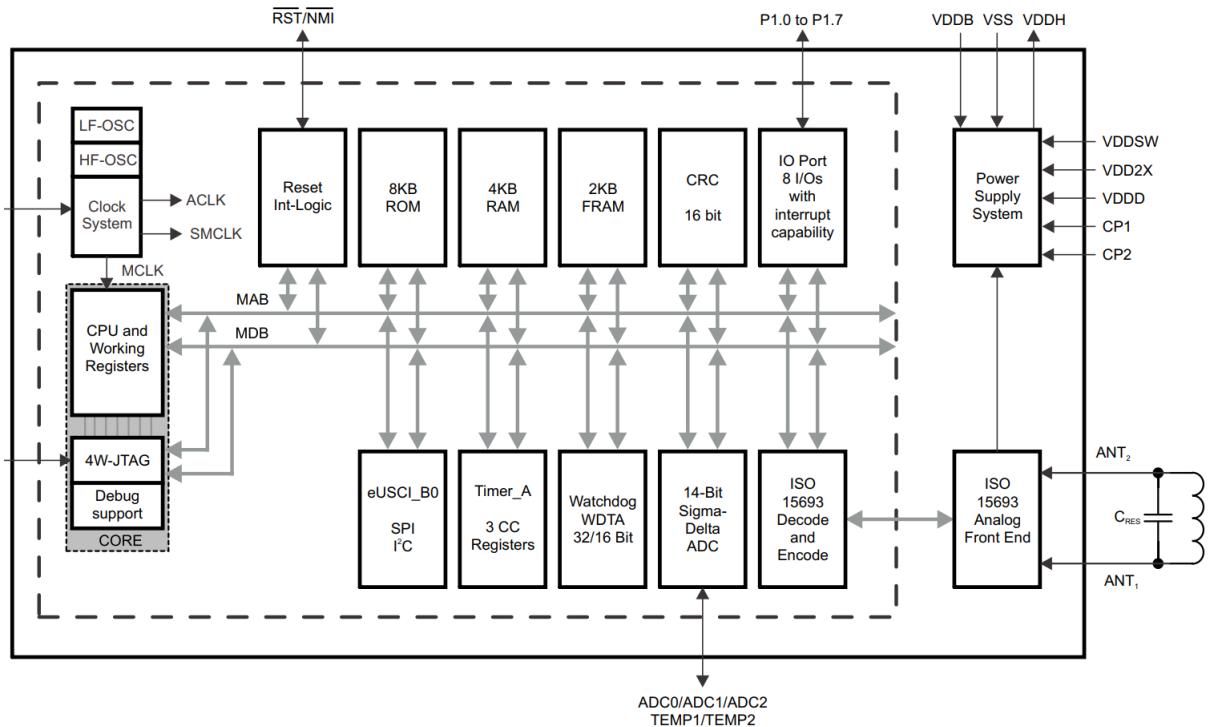
Wszystkie pomiary napięć oraz konfiguracje zasilania potwierdzały, że układy są prawidłowo zasilane i zgodne z wymaganiami producenta.

W celu diagnostyki, wykonano również próbę bezpośredniego połączenia magistrali I²C pomiędzy RF430FRL152H a FDC1004, bez użycia konwertera TXS0102 z zastosowaniem zewnętrznym rezystorów „pull-up” na płytce. Mimo to nie zaobserwowano poprawy działania, co sugerowało, że problem nie leży po stronie konwersji poziomów logicznych. Pomimo starań nie udało się nawiązać stabilnej komunikacji między mikrokontrolerem a przetwornikiem FD1004, co wskazywało na możliwe ograniczenia wynikające z wewnętrznej architektury RF430FRL152H, trybu energy harvesting lub niekompatybilności z pełną specyfikacją magistrali I²C.

Ze względu na to niepowodzenie powrócono do dalszego rozwoju i udoskonalenia metody pomiarowej z wykorzystaniem wbudowanego przetwornika analogowo-cyfrowego układu RF430RFL152H.

3.1.2. Część programowa

Układ RF430FRL152H został wyposażony w 8 kB pamięci mask ROM, 4 kB pamięci SRAM oraz 2 kB pamięci nieulotnej typu FRAM. Pamięć FRAM wykorzystywana jest głównie do przechowywania danych, jednakże w razie potrzeby może zostać zaadaptowana do implementacji rozszerzonych poleceń NFC lub alternatywnego oprogramowania układowego (rys. 3.11).



Rys. 3.11. Diagram blokowy RF430FRL152H [18]

W ośmiokilobajtowej pamięci ROM układu RF430FRL152H zaimplementowano podstawową funkcjonalność znacznika NFC-V, uwzględniającą obsługę odczytu danych z czujników oraz możliwość zdalnego przeprogramowania przez interfejs radiowy. Oprogramowanie domyślnie dostępne w pamięci ROM umożliwia realizację próbkowania sygnałów zarówno z czujników analogowych, jak i cyfrowych. Dane pomiarowe mogą być pozyskiwane z cyfrowego czujnika podłączonego za pośrednictwem magistrali I²C lub SPI, z opcjonalnego termistora, a także z innych źródeł analogowych, w tym z wewnętrznego czujnika temperatury zintegrowanego w strukturze krzemowej układu. Zebrane dane mogą być – w zależności od konfiguracji – uśredniane, zanim zostaną zapisane do pamięci FRAM. W tej samej przestrzeni pamięciowej przechowywane są również bloki odpowiedzialne za kontrolę działania oprogramowania oraz statusowe informacje operacyjne.

Natomiast w celu rozszerzenia funkcjonalności fabrycznego oprogramowania zapisanego w pamięci ROM, wymagane jest przygotowanie niewielkiej „nakładki” programowej. Jej implementacja musi być maksymalnie zoptymalizowana pod względem rozmiaru, ponieważ zarówno kod jak i wszystkie dane nieulotne muszą zostać umieszczone w ograniczonej przestrzeni 2 kB pamięci FRAM. W tej pamięci znajduje się zestaw rejestrów wirtualnych, umieszczonych bezpośrednio przed obszarem przeznaczonym na rejestrowanie danych rozpoczynając od adresu 0xF867 do 0xFFE0. Rejestry te pełnią funkcję interfejsu konfiguracyjno-sterującego dla oprogramowania układowego oraz użytkownika i umożliwiają

m.in. definiowanie parametrów pomiarowych, zarządzanie cyklami próbkowania, ustawianie źródeł sygnału wejściowego oraz monitorowanie statusu działania systemu. Każdy z rejestrów zorganizowany jest w postaci pól bitowych, które odpowiadają za konkretne funkcje logiczne i kontrolne. Struktura tych pól została szczegółowo udokumentowana w instrukcji technicznej SLAU603B, udostępnionej przez producenta [19].

Wymiana danych przebiega w postaci ramkowanej sekwencji poleceń wysyłanych przez czytnik oraz odpowiedzi generowanych przez identyfikator. Każde polecenie zawiera określoną strukturę składającą się z obowiązkowych oraz opcjonalnych pól, których obecność uzależniona jest od typu operacji oraz ustawień flag sterujących. Struktura poleceń składa się z bajtu flag, po którym następuje kod operacji, a następnie – w zależności od typu polecenia – opcjonalny identyfikator producenta oraz opcjonalny adres, determinowany przez ustawienia flag. Po tych elementach przekazywane są argumenty przypisane do danego polecenia.

Polecenia o kodach mniejszych niż 0xA0 są zgodne ze standardem i nie zawierają identyfikatora producenta. Do grupy tych poleceń należą m.in.:

- 01 – Inventory
- 02 – Stay Quiet
- 20 – Read Single Block
- 21 – Write Single Block
- 2B – Get System Information

Polecenia rozpoczynające się od 0xA0 są zarezerwowane jako komendy producenta i muszą być poprzedzone identyfikatorem 0x07. W przypadku układu RF430FRL152H stosowane są komendy niestandardowe rozpoczynające się od 0xC0, umożliwiające obsługę rozszerzonych adresów bloków przekraczających ograniczenia standardu (czyli 16-bitowe adresowanie). Do tej grupy należą m. in.:

- C0 – Niestandardowy odczyt pojedynczego bloku z 16-bitowym adresem
- C1 – Niestandardowy zapis pojedynczego bloku z 16-bitowym adresem
- C2 – Niestandardowe zablokowanie bloku z 16-bitowym adresem

Do komplikacji oprogramowania układowego dla układu RF430FRL152H wymagane jest środowisko narzędziowe *msp430-elf-gcc* oparte na kompilatorze GCC w wersji 8. Zalecane jest użycie oficjalnego zestawu narzędzi oferowanego przez Texas Instruments, dostępnego po uprzedniej rejestracji i akceptacji warunków. Niezbędne jest pobranie zarówno pakietu kompilatora, jak i zestawu plików zawierających nagłówki dla układów RF430. Wymagana jest również instalacja pakietu *srecord*, który zawiera narzędzie konwertujące format ELF do

TI-TXT, stosowanego przez narzędzia programujące. Po skonfigurowaniu środowiska komplikacja kodu źródłowego do postaci binarnej może zostać przeprowadzona przy użyciu polecenia make all w odpowiednich katalogach projektu, co skutkuje wygenerowaniem plików wynikowych w formacie .txt, gotowych do użycia w procesie programowania układu przy pomocy np. aplikacji GoodV [20].

Po odpowiednim przygotowaniu środowiska przystąpiono do napisania programu dla układu RF430FRL152H do komunikacji interfejsem I²C. Program integruje się z jego firmwarem ROM poprzez specjalne sekcje pamięci oraz tablicę patchtable, umożliwiając wywoływanie niestandardowych funkcji poprzez interfejs NFC. Główna funkcjonalność opiera się na inicjalizacji magistrali I²C, rozpoczęciu transmisji oraz odbiorze danych z urządzenia slave, w tym przypadku układu FDC1004, poprzez prosty odbiór rejestru o adresie 0xFF (ID urządzenia).

Na początku programu umieszczono konfigurację specjalnych obszarów pamięci. Tablica earlydata, przypisana do sekcji .earlyrom, zawiera wstępne dane konfiguracyjne wymagane przez ROM, takie jak ustawienia komunikacji NFC, konfiguracja bloków pamięci, kontrola zachowania urządzenia w trybie pasywnym oraz inne parametry systemowe. Dane te są interpretowane przez bootloader podczas startu mikrokontrolera, a ich brak lub nieprawidłowa struktura może uniemożliwić prawidłowe działanie kodu użytkownika (list. 3.1).

```
#define FDC1004_ADDR 0x50          // Adres I2C układu FDC1004
#define FDC1004_REG_MEAS1_MSB 0xFF // Rejestr do odczytu // Bufory do
przechowywania wyniku i flagi zakończenia I2C
volatile uint16_t i2c_result = 0xFFFF;
volatile uint8_t i2c_done = 0;

// Sekcja wymagana przez ROM bootloadera RF430
__attribute__((section(".firmwarecontrolbyte")))
const uint8_t firmwarecontrolbyte = 0x7F;

// Sekcja z danymi konfiguracyjnymi dla stosa NFC
__attribute__((section(".earlyrom")))
const uint8_t earlydata[] = {
    0x3d, 0xc7, 0x88, 0x13, 0x01, 0x00, 0x00, 0x00,
    0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00,
    0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00,
    0x62, 0xc2, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00};
```

List. 3.1. Konfiguracja firmware (sekcje .firmwarecontrolbyte i .earlyrom)

Funkcja `crc_calculate` realizuje algorytm obliczania sumy kontrolnej CRC-16 (z inicjalizacją na 0xFFFF) dla zadanej liczby słów 16-bitowych w pamięci FRAM. Jest wykorzystywana przez funkcję `crc_fixup`, której zadaniem jest przeliczenie i zapisanie poprawnych wartości CRC dla dwóch obszarów konfiguracyjnych mikrokontrolera. Obszary te znajdują się pod adresami 0xF862 i 0xF87A i są wymagane przez firmware ROM w celu zatwierdzenia poprawności danych użytkownika. Brak aktualnej sumy kontrolnej skutkowałby odrzuceniem kodu przez system podczas uruchamiania (list. 3.2).

```
// Obliczanie CRC dla pamięci ROM, wymagane przez TI ROM patch
uint16_t crc_calculate(uint16_t *src, uint16_t wordcount)
{
    CRCINIRES = 0xFFFF;
    for (uint16_t count = 0; count < wordcount; count++)
        CRCDI = src[count];
    return CRCINIRES;
}

void crc_fixup()
{
    // Obliczenie CRC dla dwóch bloków konfiguracyjnych
    SYSCNF_H &= 0xF0;
    *((uint16_t *) (0xF860 - 8)) = crc_calculate((uint16_t *) (0xF862 - 8), 0xB);
    *((uint16_t *) (0xF878 - 8)) = crc_calculate((uint16_t *) (0xF87A - 8), 0x93);
    SYSCNF_H |= 0x0F;
}
```

List. 3.2. Funkcja `crc_calculate` i `crc_fixup`

Funkcje `led_on` oraz `led_off` umożliwiają kontrolę stanu diody LED podłączonej do pinu P1.5. Diody tej używa się w celach diagnostycznych do wizualnej sygnalizacji stanu działania programu. Funkcja `blink` wykorzystuje je do wygenerowania serii błysków poprzez sekwencyjne włączanie i wyłączanie LED z określonym opóźnieniem. Jest to przydatne narzędzie do debugowania, szczególnie w środowisku z ograniczonym interfejsem do logowania (list. 3.3).

```

// Obsługa diody debugowej na P1.5
void led_on()
{
    P1SEL0 &= ~BIT5;
    P1SEL1 &= ~BIT5;
    P1DIR |= BIT5;
    P1OUT |= BIT5;
}

void led_off()
{
    P1DIR |= BIT5;
    P1OUT &= ~BIT5;
}
// Proste miganie diodą - debug etapów
void blink(uint8_t times)
{
    for (uint8_t i = 0; i < times; i++)
    {
        led_on();
        __delay_cycles(120000); //
        led_off();
        __delay_cycles(120000);
    }
}

```

List. 3.3. Funkcje led_on, led_off oraz blink

Funkcja i2c_init realizuje konfigurację kontrolera eUSCI_B0 do pracy jako master I²C z wykorzystaniem zegara systemowego SMCLK. Ustawia odpowiednie funkcje alternatywne na pinach P1.0 (SDA) i P1.1 (SCL), inicjuje kontroler w trybie reset, ustawia tryb I²C master (UCMODE_3, UCMST), ustawia źródło zegara (UCSSEL_SMCLK), definiuje szybkość transmisji (UCB0BRW = 10 dla 200 kHz przy 2 MHz SMCLK), a następnie włącza przerwania odpowiedzialne za obsługę transmisji (UCTXIE0), odbioru (UCRXIE0) oraz braku odpowiedzi (UCNACKIE) (list. 3.4).

```

// Inicjalizacja I2C w trybie Master
__attribute__((section(".fram_driver_code"))) void i2c_init()
{
    P1SEL0 |= BIT0 | BIT1; // Przełącz piny P1.0/P1.1 na funkcję I2C (SDA,
SCL)
    P1SEL1 &= ~(BIT0 | BIT1);
    UCB0CTL1 |= UCSWRST; // Wejście w tryb reset
    UCB0CTLW0 = UCSWRST | UCMODE_3 | // Tryb I2C Master, tryb 3
                UCSSEL__SMCLK | UCMST; // Źródło zegara: SMCLK
    UCB0BRW = 10; // Dzielnik zegara I2C: 2Mhz / 10 = 200kHz
    UCB0I2CSA = FDC1004_ADDR; // Ustawienie adresu slave
    UCB0CTL1 &= ~UCSWRST; // Wyjście z resetu
    UCB0IE |= UCNACKIE | UCTXIE0 | UCRXIE0; // Włączenie przerwań: NACK,
TX, RX
}

```

List. 3.4. Funkcja i2c_init

Funkcja i2c_start_read rozpoczyna transmisję odczytu z urządzenia slave. W pierwszym etapie oczekuje na zakończenie ewentualnego poprzedniego STOP (UCTXSTOP), po czym wysyła START i bajt zapisu z adresem rejestru, który ma zostać odczytany. Następnie generuje powtórny START w trybie odbioru i rozpoczyna oczekiwanie na zakończenie transmisji danych. Funkcja zawiera mechanizmy timeout dla każdego kroku, aby uniknąć zawieszenia programu w przypadku błędu komunikacji. W przypadku timeoutu wynik i2c_result ustawiany jest na wartość domyślną 0xFFFF, a flaga i2c_done na 1(list.3.5).

```

__attribute__((section(".fram_driver_code"))) void
i2c_start_read(uint8_t reg)
{
    i2c_done = 0;
    blink(1); // Etap 1: Start transmisji
    while (UCB0CTL1 & UCTXSTP) // Czekaj na koniec poprzedniego STOPa
        ;
    UCB0CTL1 |= UCTR | UCTXSTT; // Wysyłanie: START + Write
    uint32_t timeout = 1000;
    while (!(UCB0IFG & UCTXIFG0) && timeout--)
        ;
    if (!timeout)
        goto timeout_exit;
    UCB0TXBUF = reg; // Wyślij adres rejestru
    timeout = 1000;
    while (!(UCB0IFG & UCTXIFG0) && timeout--)
        ;
    if (!timeout)
        goto timeout_exit;

    blink(1); // Etap 2: adres wysłany
    UCB0CTL1 &= ~UCTR; // Przełącz na Read
    UCB0CTL1 |= UCTXSTT; // Wysyłka Repeated START

    timeout = 1000;
    while ((UCB0CTL1 & UCTXSTT) && timeout--)
        ;
    if (!timeout)
        goto timeout_exit;

    blink(1); // Etap 3: Po repeated START
    UCB0CTL1 |= UCTXSTP; // Wygeneruj STOP
    return;
timeout_exit:
    i2c_result = 0xFFFF; // W przypadku timeoutu - wynik domyślny
    i2c_done = 1;
    blink(1); // Etap 4: Timeout sygnalizowany LED
}

```

List. 3.5. Funkcja i2c_start_read

Funkcja i2c_isr jest procedurą obsługi przerwania USCI_B0_VECTOR, odpowiedzialną za reagowanie na zdarzenia magistrali I²C. W przypadku otrzymania sygnału

UCNACKIFG – czyli braku potwierdzenia (ACK) ze strony urządzenia slave – ustawiany jest wynik 0xFFFF, generowany jest sygnał STOP, flaga i2c_done ustawiana jest na 1, i przerywane jest oczekiwanie (__bic_SR_register_on_exit). W przypadku odbioru danych (UCRXIFG0), funkcja odbiera dwa bajty – najpierw bajt starszy (MSB), potem młodszy (LSB) – i zapisuje połączoną wartość do i2c_result. Po odebraniu dwóch bajtów generowany jest sygnał STOP, a program zostaje wybudzony z trybu niskiego poboru mocy (list. 3.6).

```
__attribute__((interrupt(USCI_B0_VECTOR))) void i2c_isr(void)
{
    static uint8_t byte_index = 0;
    static uint16_t result = 0;
    blink(2);
    switch (__even_in_range(UCB0IV, USCI_I2C_UCBIT9IFG))
    {
        case USCI_I2C_UCNACKIFG:
            i2c_result = 0xFFFF;
            i2c_done = 1;
            __bic_SR_register_on_exit(LPM3_bits);
            break;
        case USCI_I2C_UCRXIFG0:
            if (byte_index == 0)
            {
                result = UCB0RXBUF << 8; // Odbiór MSB
                byte_index++;
            }
            else
            {
                result |= UCB0RXBUF; // Odbiór LSB
                i2c_result = result;
                byte_index = 0;
                i2c_done = 1;
            }
            __bic_SR_register_on_exit(LPM3_bits);
            break;
        default:
            __bic_SR_register_on_exit(LPM3_bits);
            break;
    }
}
```

List. 3.6. Funkcja i2c_isr

Funkcja cmd_a5 jest przypisana do komendy 0xA5 przesyłanej przez interfejs NFC i służy do inicjalizacji magistrali I²C poprzez wywołanie i2c_init. Po zakończeniu inicjalizacji wartość 0x0001 wraz z kodem komendy 0xA5 zapisywana jest do bufora transmisji RF13MTXF, co stanowi potwierdzenie wykonania operacji (list. 3.7).

```
uint16_t __attribute__((noinline)) cmd_a5()
{
    i2c_init();
    RF13MTXF_L = 2;
    RF13MTXF = 0xA5;
    RF13MTXF = 0x0001;
    return 0;
}
```

List. 3.7. Funkcja cmd_a5

Funkcja cmd_a6 realizuje pełny cykl odczytu danych z urządzenia slave poprzez magistralę I²C. Wywoływana w odpowiedzi na komendę 0xA6, inicjuje operację odczytu za pomocą i2c_start_read, następnie czeka przez ograniczony czas na ustawienie flagi i2c_done. Jeśli flaga zostanie ustawiona, wynik odczytu (i2c_result) zostaje przesłany do bufora NFC. W przeciwnym przypadku, czyli po wystąpieniu timeoutu, zwracana jest wartość specjalna 0xFFFFB, oznaczająca niepowodzenie. Po zakończeniu funkcja czyści flagi transmisji i wyłącza przerwania eUSCI (list. 3.8).

```

uint16_t __attribute__((noinline)) cmd_a6()
{
    i2c_start_read(FDC1004_REG_MEAS1_MSB);
    uint32_t timeout = 1000; // 10ms
    while (!i2c_done && timeout--)
        ; // Czekaj na zakończenie transmisji
    // Bezpieczny wynik
    uint16_t result = i2c_done ? i2c_result : 0xFFFF;

    if (UCB0CTL1 & UCTXSTT)
        UCB0CTL1 &= ~UCTXSTT;
    UCB0CTL1 |= UCTXSTP; // Zakończenie transmisji
    RF13MTXF_L = 2;
    RF13MTXF = 0xA6;
    RF13MTXF = result; // Wysłanie wyniku przez RF
    UCB0IE = 0;          // Wyłącz przerwania I2C
    // Czyść flagi
    UCB0IFG &= ~(UCRXIFG0 | UCTXIFG0 | UCNACKIFG);
    i2c_done = 0;
    return 0;
}

```

List. 3.8. Funkcja cmd_a6

Funkcja cmd_a0 jest przypisana do komendy 0xA0 i pełni rolę funkcji testowej. Po jej wywołaniu następuje krótkie zapalenie i zgaszenie diody LED, po czym wysyłany jest wynik 0xFFFFA jako potwierdzenie wykonania testu. Funkcja pozwala na weryfikację poprawnego działania kodu i magistrali NFC (list. 3.9).

```

// Komenda A0 - test ping: LED + odpowiedź
uint16_t __attribute__((noinline)) cmd_a0()
{
    led_on();
    __delay_cycles(50000);
    led_off();
    RF13MTXF_L = 2;
    RF13MTXF = 0xA0;
    RF13MTXF = 0xFFFFA;
    return 0;
}

```

List. 3.9. Funkcja cmd_a0

Funkcja main stanowi punkt wejścia do programu. W pierwszym kroku wyłączany jest mechanizm watchdog (WDTCTL = WDTPW | WDTHOLD), po czym wywoływana jest funkcja crc_fixup, która przygotowuje odpowiednie wartości CRC dla ROM-u. Następnie program przechodzi w nieskończoną pętlę w trybie niskiego poboru mocy LPM3, aktywując globalne przerwania i oczekując na żądania przychodzące przez interfejs NFC (list. 3.10).

```
int main(void)
{
    WDTCTL = WDTPW | WDTHOLD; // Zatrzymaj Watchdog
    crc_fixup(); // Naprawa CRC dla ROM

    while (1)
    {
        __bis_SR_register(LPM3_bits | GIE); // Wejście w tryb niskiego
        poboru mocy + przerwania
    }
}
```

List. 3.10. Funkcja main

Tablica patchtable, umieszczona w sekcji .rompatch, definiuje przypisania komend przesyłanych przez interfejs NFC do odpowiednich funkcji programu użytkownika. Dla komend 0xA0, 0xA5 i 0xA6 zdefiniowane są wskaźniki odpowiednio do funkcji cmd_a0, cmd_a5 oraz cmd_a6. Dzięki tej tablicy możliwa jest dynamiczna rozbudowa firmware'u ROM bez konieczności jego modyfikacji oraz obsługa komend przez interfejs RF – mechanizm ten jest integralną częścią koncepcji RF430FRL152H jako mikrokontrolera wspomaganego sprzętowo (list. 3.11).

```
__attribute__((section(".rompatch")))
const uint16_t patchtable[0x12] = {
    0xCECE, 0xCECE, 0xCECE,
    0xCECE, 0xCECE, 0xCECE,
    0xCECE, 0xCECE, 0xCECE,
    0xCECE, 0xCECE,
    (uint16_t)cmd_a6, 0x00A6,
    (uint16_t)cmd_a5, 0x00A5,
    (uint16_t)cmd_a0, 0x00A0,
    0xCECE};
```

List. 3.11. Patchtable – tablica funkcji ROM

Ze względu na brak standardowego interfejsu debugowania JTAG w układzie RF430FRL152H, cały proces weryfikacji działania oprogramowania musiał być realizowany za pomocą interfejsu NFC, przez który przesyłano wyniki testów w odpowiedzi na wysyłane komendy.

Pomimo, wydawało by się, poprawnego kodu opartego o dostępną dokumentację i przykłady udostępnione przez Texas Instruments napotkano trudność polegającą na braku odpowiedzi ze strony urządzenia slave oraz nieuruchamianiu się przerwania eUSCI_B0. Komenda A5 (inicjalizacja I²C) wykonywała się prawidłowo, komenda A6 (odczyt danych z rejestru 0xFF FDC1004) kończyła się zwróceniem kodu 0xFFFFB, co wskazuje na timeout oczekiwania na zakończenie transmisji, flaga i2c_done, ustawiana w procedurze przerwania, nigdy nie była aktywowana, dioda debugowa, zapalana w obsłudze przerwania USCI_B0_VECTOR, nie reagowała, co jednoznacznie wskazywało na brak wywołania ISR (z ang. Interrupt Service Routine). Widoczne były za to trzy mignięcia diody co udowadnia, że funkcja i2c_start_read się wykonuje.

Bazując na powyższym, możliwe przyczyny niepowodzenia to problem z liniami SDA/SCL lub nieprawidłowe napięcie zasilania lub stan resetu układu FDC1004. Dodatkowo występował problem po stronie mikrokontrolera, wynikający z: niepoprawnej rejestracji procedury przerwania I²C w pliku linkera lub źródłowym, błędny umieszczenia ISR w pamięci (.fram_driver_code), które mogło spowodować, że wektor przerwań nie wskazywał na poprawny kod, nieobsłużonego wyjątku, prowadzącego do wewnętrznego resetu układu.

Ze względu na ograniczenia platformy (m.in. okrojony kompilator bez pełnego wsparcia #pragma oraz ograniczoną możliwość debugowania magistrali I²C), nie udało się jednoznacznie ustalić, czy przyczyną był brak reakcji FDC1004 czy nieprawidłowe przypisanie wektora przerwania. Podejmowane próby obejmowały:

- ręczną analizę przebiegu transmisji I²C (przez diody LED),
- timeouty i stany awaryjne w kodzie,
- testowe rejestracje ISR z różnymi metodami (m.in. __attribute__((interrupt)) oraz __interrupt).

Niestety, mimo wielu prób nie udało się przejść do kolejnego etapu, jakim było odczytanie wartości z rejestru identyfikacyjnego FDC1004 (adres 0xFE). Po dodaniu kolejnych kroków komunikacji (wysłanie adresu rejestru i próba odczytu danych) urządzenie RF430 ponownie ulegało resetowi. Próbowano również obniżenia prędkości magistrali, uproszczenia

sekwencji transmisji oraz skanowania całego zakresu adresów urządzeń I²C — bez powodzenia.

Przyczyną braku sukcesu mogły być:

- brak pełnego wsparcia trybu master I²C w RF430FRL152H w kontekście synchronizacji z zewnętrznymi urządzeniami,
- ograniczenia związane z zasilaniem RF430 i jego stabilnością podczas transmisji,
- niewłaściwa synchronizacja czasowa,
- błędy sprzętowe lub niedostrzegalne interferencje logiczne,
- ograniczenia ROM-u, który może zakłócać pracę peryferiów bez pełnego debugowania (brak informacji w dokumentacji).

Pomimo wielu prób oraz częściowych sukcesów w inicjalizacji magistrali, nie udało się nawiązać pełnej dwukierunkowej komunikacji z FDC1004. Etap ten pozwolił jednak na dokładną analizę funkcjonowania interfejsu I²C w RF430FRL152H oraz na dokładne zrozumienie jego ograniczeń.

W związku z tym, w celu umożliwienia minimalnej, podstawowej analizy czujników przygotowano kod obsługujący podstawowe funkcje GPIO oraz inicjalizację i odczyt z wbudowanego przetwornika analogowo-cyfrowego typu SD14.

Zaimplementowano te same sekcje .firmwarecontrolbyte, .earlyrom, .earlydata, .crc_calculate, .crc_fixup jak poprzednio. Następnie zdefiniowano odpowiednie funkcje.

Funkcja cmd_a1 realizuje ustawienie logicznego stanu wysokiego na pinie P1.5. Piny SEL0 i SEL1 są czyszczone, co przełącza pin P1.5 w tryb GPIO. Następnie pin ten zostaje ustawiony jako wyjściowy (DIR |= BIT5) i aktywowany (OUT |= BIT5). Dodatkowo wynik wykonania komendy – kod 0x0001 – jest zapisywany do bufora NFC (RF13MTXF), co pozwala czytnikowi NFC na odebranie potwierdzenia. Funkcja cmd_a4 wykonuje operację odwrotną do cmd_a1, czyli ustawia logiczny stan niski na pinie P1.5. Podobnie jak wcześniej, pin jest przełączany w tryb GPIO i ustawiany jako wyjściowy, po czym jego wyjście zostaje wyzerowane (OUT &= ~BIT5). Wynik wykonania komendy – 0x0000 – zostaje zapisany do bufora transmisji NFC jako potwierdzenie wykonania polecenia (list. 3.12).

```

// Komenda A1: ustawienie P1.5 na wysoki ---
uint16_t __attribute__((noinline)) cmd_a1()
{
    P1SEL0 &= ~BIT5;
    P1SEL1 &= ~BIT5;
    P1DIR |= BIT5;
    P1OUT |= BIT5;

    RF13MTXF_L = 2;
    RF13MTXF = 0xA1;
    RF13MTXF = 0x0001;
    return 0;
}

// Komenda A4: ustawienie P1.5 na niski ---
uint16_t __attribute__((noinline)) cmd_a4()
{
    P1SEL0 &= ~BIT5;
    P1SEL1 &= ~BIT5;
    P1DIR |= BIT5;
    P1OUT &= ~BIT5;

    RF13MTXF_L = 2;
    RF13MTXF = 0xA4;
    RF13MTXF = 0x0000;
    return 0;
}

```

List. 3.12. Funkcja cmd_a1 i cmd_a4

Funkcja cmd_a3 odpowiada za konfigurację 14-bitowego przetwornika analogowo-cyfrowego SD14. W pierwszej kolejności zapalana jest dioda LED podłączona do pinu P1.5 w celu sygnalizacji rozpoczęcia konfiguracji. Rejestr sterujący SD14CTL1 jest następnie ustawiany z odpowiednimi bitami konfiguracji, co obejmuje wybór kanału wejściowego ADC0 (SD14INCH__ADC0), wyzwalanie pomiaru przy pierwszej próbce (SD14INTDLY__1st), użycie filtra CIC z dzielniukiem 128 (SD14RATE__CIC128, SD14FILT__CIC), wzmacnienie x2 (SD14GAIN__2) oraz tryb unipolarny (SD14UNI). Po odczekaniu ustalonego czasu (__delay_cycles(80000)), który umożliwia stabilizację przetwornika, pin LED zostaje zgaszony. Funkcja kończy się zapisaniem wartości SD14CTL1 do bufora NFC jako informacja o konfiguracji (list. 3.13).

```

// Komenda A3: konfiguracja SD14 ---
uint16_t __attribute__((noinline)) cmd_a3()
{
    P1SEL0 &= ~BIT5;
    P1SEL1 &= ~BIT5;
    P1DIR |= BIT5;
    P1OUT |= BIT5;
    // Konfiguracja SD14: Kanał ADC0, wzmacnienie x2, tryb unipolarny,
    filtr CIC, dokładność 128
    SD14CTL0 = 0;
    SD14CTL1 = SD14INCH__ADC0 | SD14INTDLY__1st | SD14RATE__CIC128 |
    SD14FILT__CIC | SD14GAIN__2 | SD14UNI;
    __delay_cycles(80000);
    P1OUT &= ~BIT5;

    RF13MTXF_L = 2;
    RF13MTXF = 0xA3;
    RF13MTXF = SD14CTL1;

    return 0;
}

```

List. 3.13. Funkcja cmd_a3

Funkcja cmd_a2 realizuje jednorazowy pomiar przy użyciu wcześniej skonfigurowanego przetwornika SD14. Na początku sprawdzane jest, czy bieżąca konfiguracja wskazuje na wykorzystanie kanału ADC0 – jeśli nie, funkcja natychmiast zwraca 0xFFFF jako wynik błędu. Następnie przetwornik jest aktywowany poprzez ustawienie bitów SD14EN, SD14SSEL__ACLK oraz VIRTGND, a pomiar uruchamiany jest za pomocą bitu SD14SC. Program czeka na ustawienie flagi zakończenia pomiaru SD14IFG, po czym wynik odczytywany jest z rejestru SD14MEM0 i zapisywany do bufora NFC (list. 3.14).

```

// Komenda A2: pomiar z aktualną konfiguracją ---
uint16_t __attribute__((noinline)) cmd_a2()
{
    uint16_t result = 0xFFFF;

    if ((SD14CTL1 & 0x0007) != SD14INCH__ADC0)
    {
        RF13MTXF_L = 2;
        RF13MTXF = 0xA2;
        RF13MTXF = 0xFFFF;
        return 0;
    }

    SD14CTL0 &= ~SD14IFG; // Wyczyszczenie flagi
//Włączenie SD14: Zegar ACLK, GND jako odniesienie
    SD14CTL0 |= SD14EN | SD14SSEL__ACLK | VIRTGND;
    SD14CTL0 |= SD14SC;

    while (!(SD14CTL0 & SD14IFG))
        ;

    result = SD14MEM0;

    RF13MTXF_L = 2;
    RF13MTXF = 0xA2;
    RF13MTXF = result;
    return 0;
}

```

List. 3.14. Funkcja cmd_a2

Funkcja main zawiera główną pętlę programu użytkownika. W każdej iteracji wywoływana jest funkcja crc_fixup w celu zapewnienia, że dane konfiguracyjne mają aktualne sumy kontrolne CRC. Następnie mikrokontroler przechodzi w tryb niskiego poboru mocy LPM3, z aktywnym globalnym systemem przerwań (GIE). Program oczekuje pasywnie na komendy przesyłane z zewnętrznego czytnika NFC, które powodują wybudzenie i wykonanie przypisanych funkcji. Tablica patchtable umieszczona w sekcji .rompatch przypisuje konkretne komendy otrzymywane przez interfejs NFC do funkcji użytkownika zdefiniowanych w programie. Tablica zawiera skojarzenia kodów komend z adresami funkcji cmd_a1, cmd_a2, cmd_a3 i cmd_a4, odpowiednio dla kodów 0xA1–0xA4. Dzięki temu, po odebraniu ramki komendy przez RF430FRL152H, firmware ROM automatycznie przekierowuje jej obsługę do

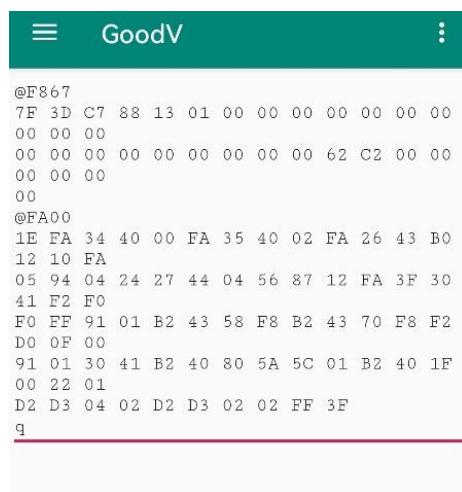
odpowiedniego fragmentu kodu użytkownika bez konieczności ręcznej analizy zawartości wiadomości (list. 3.15).

```
int main(void)
{
    while (1)
    {
        crc_fixup();
        __bis_SR_register(LPM3_bits | GIE);
        return 0;
    }

__attribute__((section(".rompatch")))
const uint16_t patchtable[0x12] = {
    0xCECE, 0xCECE, 0xCECE,
    0xCECE, 0xCECE, 0xCECE,
    0xCECE, 0xCECE, 0xCECE,
    (uint16_t)cmd_a4, 0x00A4,
    (uint16_t)cmd_a3, 0x00A3,
    (uint16_t)cmd_a2, 0x00A2,
    (uint16_t)cmd_a1, 0x00A1,
    0xCECE};
```

List. 3.15. Funkcja main i tablica patch

Skompilowaną, działającą wersję programu w postaci tekstowej kopiowano do aplikacji GoodV (rys. 3.10) i programowano układ przez zbliżenie smartfonu do anteny.



The screenshot shows the GoodV application interface. The top bar has a menu icon, the title "GoodV", and a more options icon. The main area displays assembly code starting with @F867 followed by several lines of hex values. At the bottom of the code area, there is a red underline under the letter 'q'.

```
@F867
7F 3D C7 88 13 01 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
00 00 00
00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 62 C2 00 00
00 00 00
00
@FA00
1E FA 34 40 00 FA 35 40 02 FA 26 43 B0
12 10 FA
05 94 04 24 27 44 04 56 87 12 FA 3F 30
41 F2 F0
F0 FF 91 01 B2 43 58 F8 B2 43 70 F8 F2
D0 0F 00
91 01 30 41 B2 40 80 5A 5C 01 B2 40 1F
00 22 01
D2 D3 04 02 D2 D3 02 02 FF 3F
q
```

Rys. 3.10. Widok okna programowania w aplikacji GoodV

Konwersja wyników na wartość napięcia nie jest realizowana bezpośrednio w układzie RF430FRL152H. Zamiast tego, surowe dane z przetwornika są zapisywane w rejestrze i przesyłane drogą radiową. Sprawdzenie działania układu oraz zaprogramowanych poleceń sprawdzano przy użyciu aplikacji NFC Tools, której niestety brakowało opcji automatyzacji wysyłania poleceń. Z tego też powodu zdecydowano się na zaprogramowanie własnej aplikacji mobilnej. Aplikacja ta została zaprojektowana w konkretnym celu do realizacji komunikacji bezprzewodowej z układami RFID zgodnymi ze standardem ISO 15693 (NFC-V) przy wykorzystaniu technologii NFC dostępnej w urządzeniach z systemem Android. Umożliwia ona wysyłanie komend w formacie heksadecymalnym bezpośrednio do układów NFC oraz odbieranie odpowiedzi w czasie rzeczywistym. Otrzymane dane prezentowane są w formie ciągów heksadecymalnych, a w przypadku zawartości wskazującej na wynik pomiaru (np. wartość przetwornika ADC), aplikacja dokonuje ich przeliczenia na odpowiadającą wartość napięcia z zastosowaniem odpowiedniego wzoru fizycznego. Wszystkie operacje komunikacyjne, w tym wysyłane komendy i odebrane odpowiedzi, rejestrowane są w postaci logu tekstowego, umożliwiającego bieżącą kontrolę i analizę przebiegu transmisji. Dodatkowo, aplikacja udostępnia dynamiczny wykres, który w czasie rzeczywistym wizualizuje zmiany zmierzonych wartości napięcia w dziedzinie czasu. Ograniczeniem jest czas odpowiedzi układu, który dzięki odpowiedniej optymalizacji firmware udało się uzyskać na poziomie 15 ms. Po wykonaniu pomiarów możliwe jest wyeksportowanie danych do pliku tekstopwego. Interfejs umożliwia definiowanie liczby pomiarów, w tym jej uruchomienie w trybie ciągłym. Wartość wzmacnienia (gain) pobierana jest dynamicznie przed rozpoczęciem pomiaru z użyciem komendy A3. Na podstawie przesłanej odpowiedzi możliwe jest odczytanie zakodowanej wartości pomiaru (danych z przetwornika ADC), przeliczenie jej na odpowiadającą wartość napięcia elektrycznego oraz dynamiczne prezentowanie tej wartości na wykresie liniowym. Szczegółowe obliczenia niezbędne do przeprowadzenia tej konwersji opisuje wzór 3.1[19].

$$V = \frac{\frac{ADCData}{2^{14}-1} \cdot 0,9 [V]}{PGAMulti} \quad (3.1)$$

gdzie: $ADCData$ – surowa wartość zmierzona przez ADC, $PGAMulti$ – wybrane wzmacnienie PGA.

Ze względu na obszerność kodu aplikacji i jej nieistotność przedstawiono jedynie obsługę pomiarów i wysyłania komend. Po naciśnięciu przycisku “Pomiar” wykonywana jest sekwencja przygotowawcza, w której aplikacja:

- wysyła komendę A3, która inicjalizuje przetwornik analogowo-cyfrowy SD14 i odczytuje jego konfigurację;
- na podstawie odpowiedzi z komendy A3 analizuje wartość współczynnika wzmacnienia GAIN oraz zapisuje go do zmiennej gainFactor, co jest niezbędne do późniejszego przeliczenia wartości napięcia;
- wysyła komendę A1, która załącza zasilanie przetwornika oraz układów analogowych w RF430.

Po wykonaniu konfiguracji rozpoczyna się cykliczne wysyłanie komendy A2, która odpowiada za odczyt wyniku pomiaru napięcia. Każda odebrana odpowiedź z komendy A2 jest analizowana w funkcji calculateVoltageFromResponse, która interpretuje bajty odpowiedzi jako 14-bitową wartość ADC i przelicza ją na napięcie wyrażone w woltach. Przeliczenie uwzględnia napięcie referencyjne VREF równe 0,9 V oraz współczynnik wzmacnienia gainFactor (list. 3.16). Obliczone napięcie jest następnie prezentowane na ekranie oraz zapisywane do zbioru danych wykresu dataSet, co umożliwia jego wizualizację w czasie rzeczywistym.

```
private double calculateVoltageFromResponse(byte[] response) {
    // Sprawdzenie, czy odpowiedź ma co najmniej 5 bajtów
    // oraz czy drugi bajt to komenda A2 (pomiar) lub A3
    // (konfiguracja)
    if (response.length < 5 || (response[1] != (byte) 0xA2 &&
        response[1] != (byte) 0xA3)) {
        return -1;
    }
    // Bajty 3 i 4 zawierają wynik pomiaru w formacie 16-bit
    int highByte = response[4] & 0xFF; // Starszy bajt (MSB)
    int lowByte = response[3] & 0xFF; // Młodszy bajt (LSB)
    // Złożenie dwóch bajtów w jedną wartość 16-bitową
    int adcValue = (highByte << 8) | lowByte;
    // Max możliwa wartość 14-bit przetwornika ADC ( $2^{14} - 1 = 16383$ )
    final int ADC_MAX = (1 << 14) - 1;
    // Napięcie odniesienia przetwornika ADC w RF430FRL152H (0,9 V)
    final double VREF = 0.9;
    // Obliczenie napięcia na podstawie wartości ADC, z
    // uwzględnieniem wzmacnienia
    return ((adcValue / (double) ADC_MAX) * VREF) / gainFactor;
}
```

List. 3.16. Funkcja calculateVoltageFromResponse

Ostateczne działanie aplikacji oraz otrzymane wyniki pomiarów można zaobserwować na rysunku 3.11.



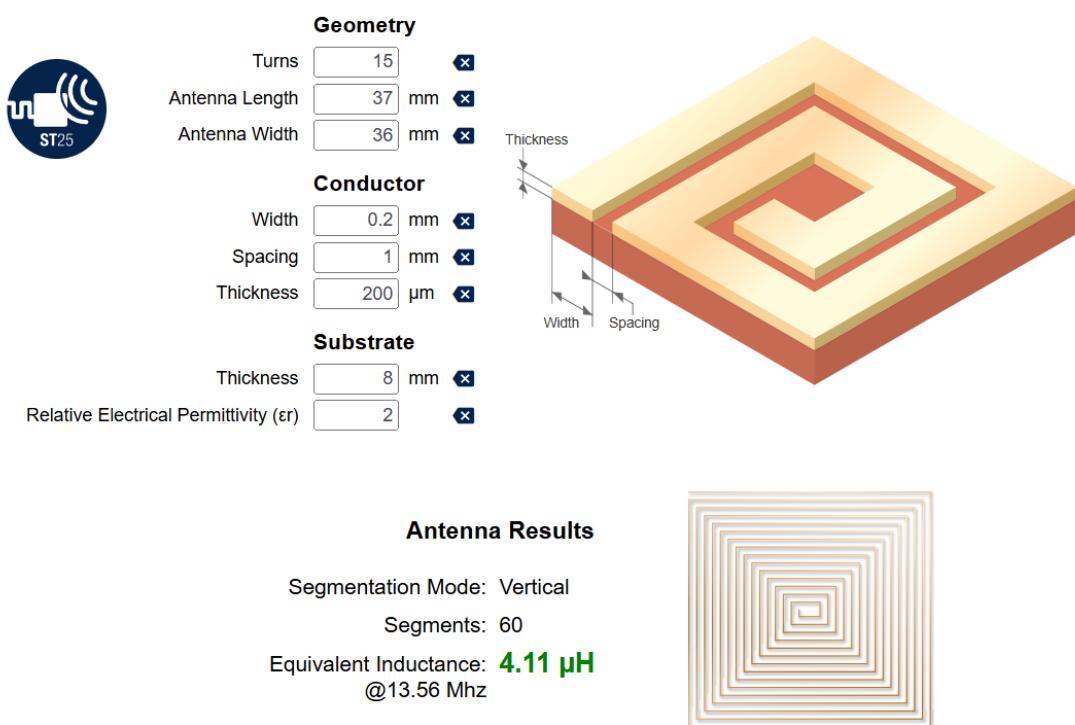
Rys. 3.11. Widok działania aplikacji

Zaprojektowany i zaimplementowany program umożliwia pełną kontrolę nad przetwornikiem analogowo-cyfrowym SD14 zintegrowanym w układzie RF430FRL152H. Osiągnięto funkcjonalność wykonywania pomiarów napięcia z wejścia ADC0 oraz przesyłania wyników drogą bezprzewodową za pośrednictwem interfejsu NFC zgodnego z protokołem ISO15693 do aplikacji mobilnej.

3.2. Projektowanie anteny

W ramach wstępnego etapu prac badawczych zaprojektowano antennę NFC o wymiarach zewnętrznych 36×37 mm (rys. 3.12), wykonaną techniką haftu w programie PE-DESIGN 11 z zastosowaniem posrebrzonej nici przewodzącej SilverTech (Amann Group), typ L99YF 30 Tex 96 o deklarowanej rezystancji do 85Ω na metr. Podstawową analizę wykonano przy użyciu

narzędzia online „NFC Inductance” firmy STMicroelectronics. Kalkulator ten służy głównie do wyznaczenia indukcyjności anteny PCB, mimo to dostrzeżono możliwość wykorzystania go w tym projekcie. Wprowadzono wymiary przewodnika - nici przewodzącej (ang. *conductor*) oraz parametry podłoża (ang. *substrate*) tekstylnego z poliestru. Mając na uwadze pojemność wewnętrzną C_{INT} układu zadeklarowaną przez producenta na $35 \text{ pF} \pm 10\%$ dopasowano konstrukcję anteny do uzyskania częstotliwości rezonansowej. Zgodnie z zaleceniami zawartymi w dokumentacji, w celu optymalnej pracy oraz w przypadku braku zewnętrznych pojemności, wartość indukcyjności anteny powinna się mieścić w zakresie $3,57 \div 4,28 \mu\text{H}$ (przyjmując $f_{\text{res}} \approx 13,7 \text{ MHz}$ i mając na uwadze tolerancję C_{INT}) [21].

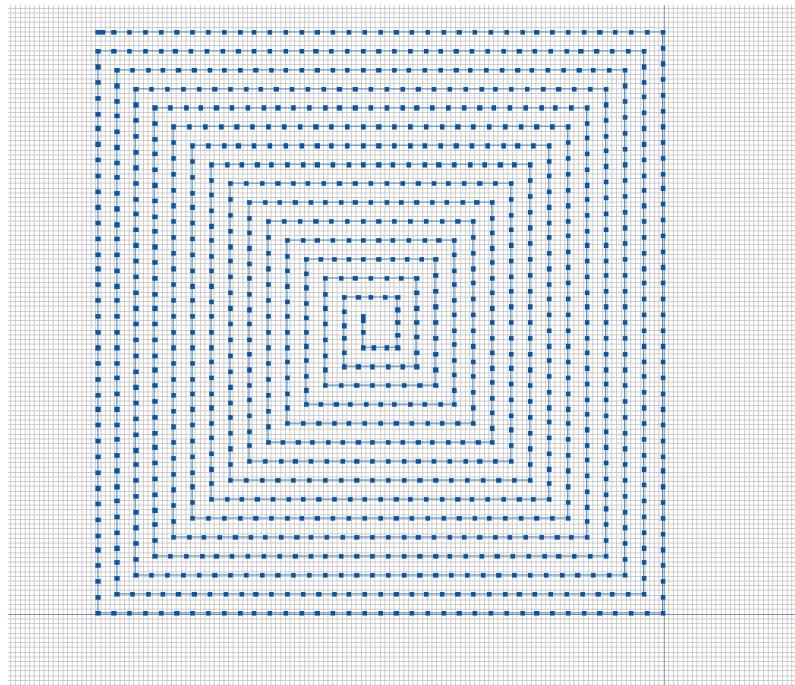


Rys. 3.12. Widok wyniku obliczeń indukcyjności

Pomimo iż częstotliwość pracy systemów NFC, jak wspomniano w części teoretycznej, jest znormalizowana i wynosi 13,56 MHz, Texas Instruments zaleca strojenie anten czytników NFC na wyższą częstotliwość. Rekomendacja ta wynika z praktycznych uwarunkowań pracy układu w rzeczywistych warunkach. Podczas interakcji z identyfikatorem, na skutek sprzężenia wzajemnego pomiędzy jego anteną a anteną czytnika, dochodzi do przesunięcia częstotliwości rezonansowej układu antenowego w dół. W związku z tym, aby zapewnić maksymalną sprawność transmisji energii oraz poprawność demodulacji sygnału w warunkach obciążenia, antena powinna być nastrojona na nieco wyższą częstotliwość w stanie nieobciążonym. W efekcie, efektywna częstotliwość rezonansowa układu zbliża się do nominalnej wartości

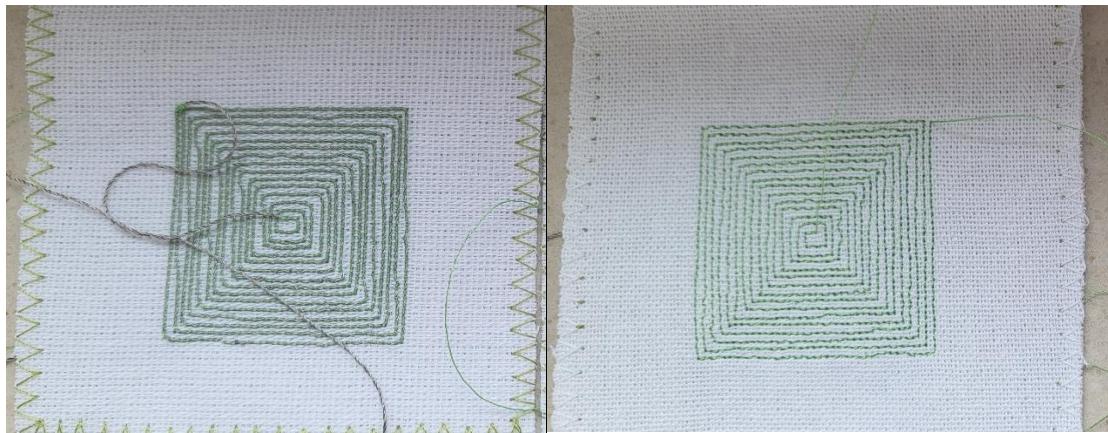
13,56 MHz. Dodatkowo, wyższa częstotliwość strojenia pozwala zredukować wpływ tolerancji elementów pasywnych (indukcyjności i pojemności), a także uwzględnia zmienność parametrów wynikającą z obecności materiałów obudowy urządzenia czy też elementów metalowych w otoczeniu anteny. Rekomendacja strojenia anteny na częstotliwość 13,7 MHz jest zatem kompromisem, który zapewnia optymalne warunki pracy układu w rzeczywistych zastosowaniach oraz zgodność z wymaganiami norm NFC w warstwie fizycznej.

Moduł antenowy próbek został wykonany na podłożu lnianym z wykorzystaniem maszyny hafciarskiej Brother INNOV-IS V3 (Brother Industries, Nagoya, Japonia). Jako metodę haftu wybrano ścieg prosty z milimetrowym odstępem (rys. 3.13).



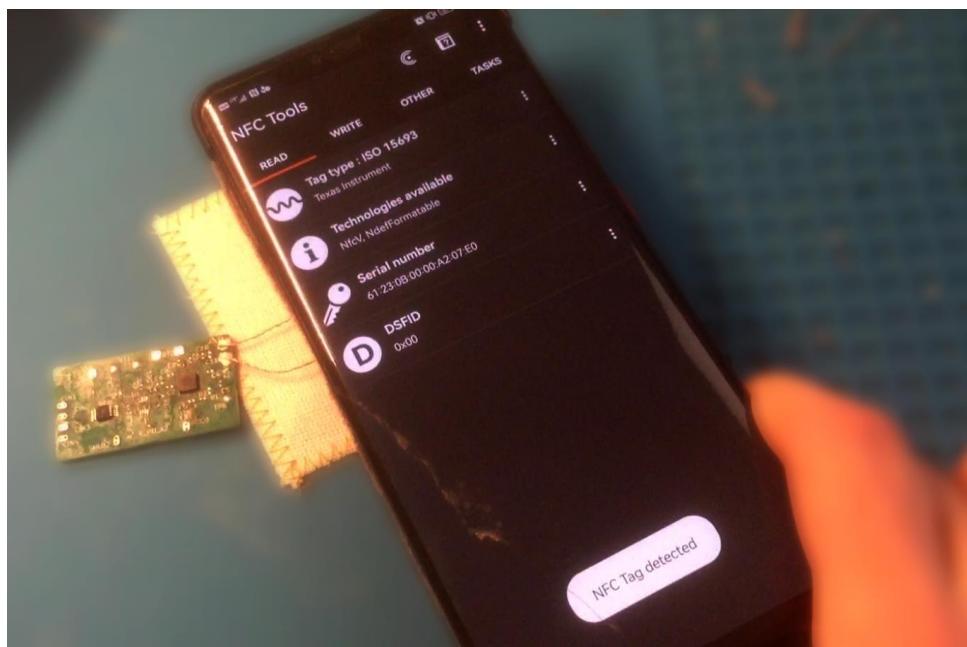
Rys. 3.13. Widok projektu anteny w programie PE-DESIGN 11

Konstrukcja anteny opierała się na spiralnej geometrii zrealizowanej w postaci 15 zwojów, z zachowaniem odstępu około 1 mm pomiędzy kolejnymi ścieżkami. Całkowita długość użytej nici wyniosła ok. 1,05 metra. Na rysunku 3.14 przedstawiono gotowy haft dwóch próbek zaprojektowanej anteny. Oczywiście centralne wyprowadzenie nici należało przewleć na drugą stronę w celu wyeliminowania możliwości wystąpienia zwarcia.



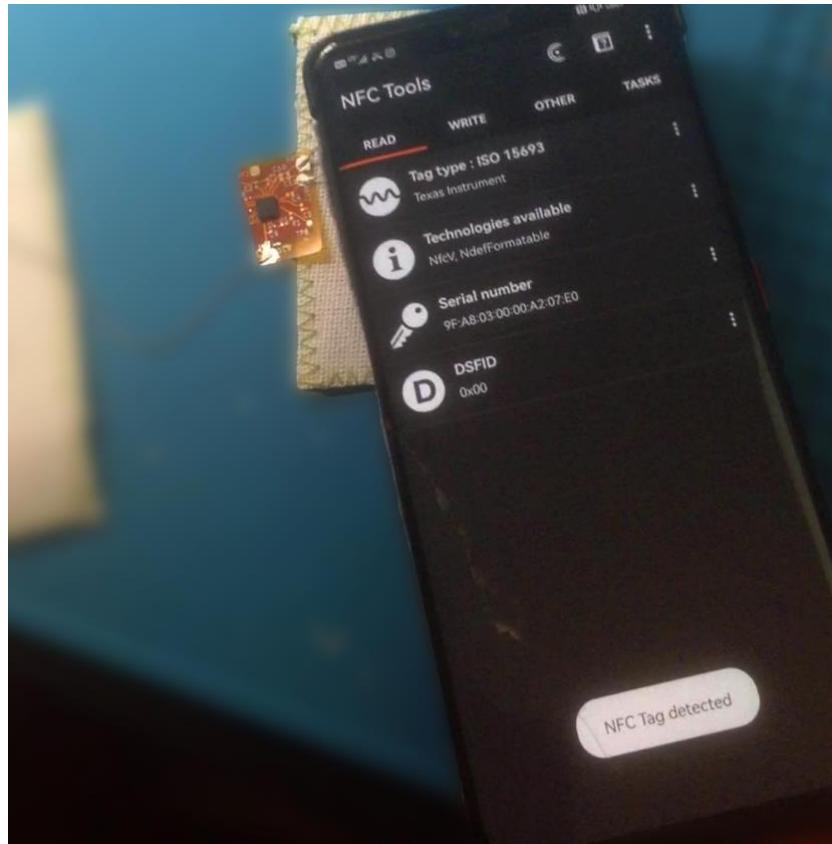
Rys. 3.14. Gotowy haft anten

Pomiar indukcyjności z użyciem mostka RLC wykonanych anten wykazał wartości 4,1 i $4,2 \mu\text{H}$, natomiast rezystancja całkowita obwodu antenowego wyniosła około 90Ω , co potwierdziło zadeklarowaną wartość rezystywności przez producenta. Wysoka rezystancja oraz graniczna wartość indukcyjności mogła wskazywać, iż zaprojektowana struktura nie będzie przystosowana do efektywnej pracy w standardzie NFC. Natomiast podczas diagnostyki okazało się, że antena spełnia swoje zadanie. Zauważono jednak, że czas nawiązania połączenia jest znacznie dłuższy w porównaniu do anten PCB. Połączenia zabezpieczono przy pomocy kleju elektroprzewodzącego MECHANIK MCN-DJ002. Komunikacja z układem przebiega pomyślnie, możliwe było odczytanie informacji o identyfikatorze (rys 3.15) i całego bloku pamięci. Udało się nawiązać komunikację w odległości 3,5 cm. Wartość napięcia VDDH była niemal identyczna jak wartość dla anteny PCB.



Rys. 3.15. Potwierdzenie działania haftowanej anteny

Udało się nawiązać komunikację bez zewnętrznych kondensatorów dostrajających (C10, C11) i wykorzystując pojemność wewnętrzną układu RF430RFL152H. Drugą próbkę sprawdzono w układzie na elastycznym podłożu (rys. 3.16).



Rys. 3.16. Potwierdzenie działania drugiej próbki haftowanej anteny na podłożu elastycznym

Przeprowadzona analiza wskazuje, iż powyższy projekt anteny zrealizowany z nicią przewodzącej w opisanej formie może funkcjonować poprawnie w kontekście komunikacji z urządzeniami mobilnymi. Nie są wymagane dodatkowe pojemności dostrajające co umożliwia uproszczenie układu do minimalnej postaci.

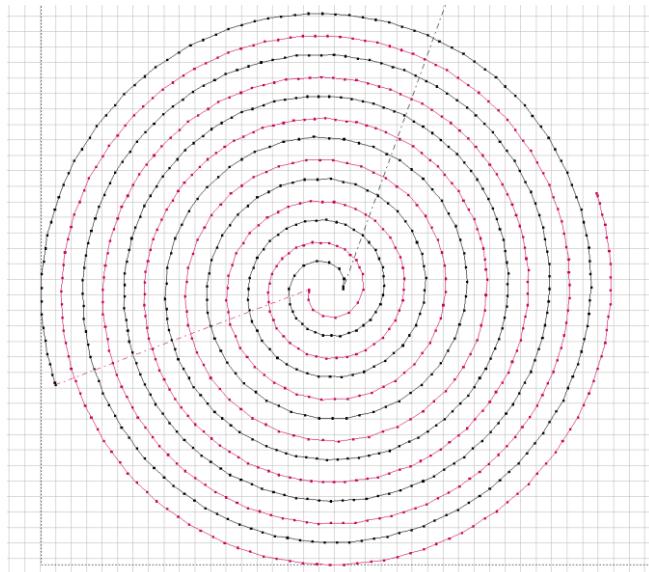
Główny czynnik, na który należy zwrócić uwagę to wysoka rezystancja przewodnika (nici), prowadząca do strat energetycznych, co przekłada się na obniżoną efektywność sprzężenia.

3.3. Projektowanie czujnika pojemnościowego

W ramach badań eksperymentalnych opracowano kilka wariantów czujników pojemnościowych wykonanych techniką haftu z wykorzystaniem przewodzących nici tekstylnych. Każdy z czujników został zaprojektowany w innej geometrii, przy zastosowaniu

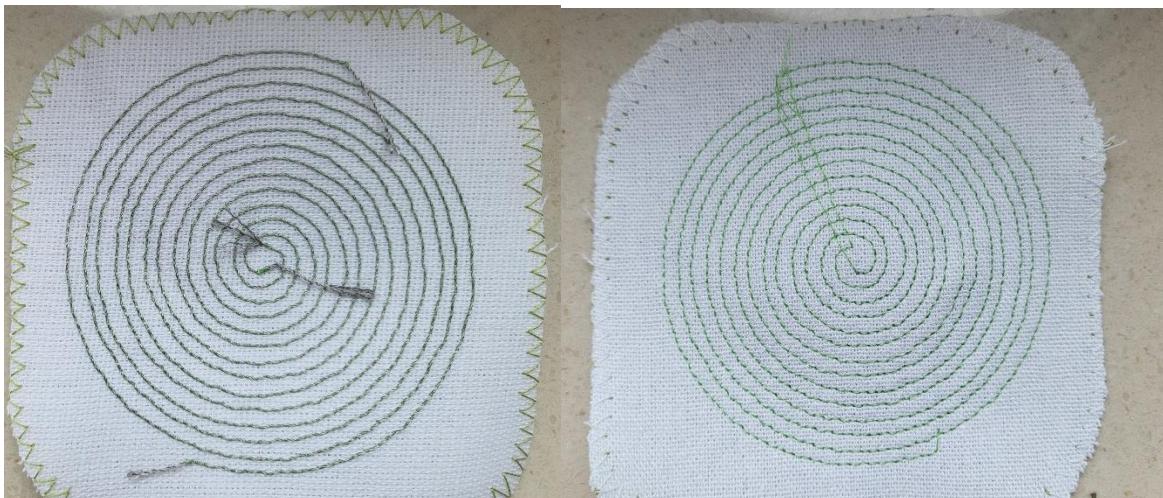
różnych typów nici, co miało na celu zbadanie wpływu geometrii oraz właściwości materiałowych na zmierzoną wartość pojemności elektrostatycznej.

Pierwszy wariant czujnika zrealizowano jako dwie równoległe spirale o średnicy zewnętrznej 74 mm, rozmieszczone względem siebie w odstępie 2 mm (rys. 3.17).



Rys. 3.17. Projekt spiralnego czujnika pojemnościowego

Całość została wyhaftowana z przewodzącej nici na płaskim materiale tekstylnym (rys. 3.18). Dokładność wykonania haftu jest zadowalająca i spełnia założenia projektu pomimo złego ustalenia miejsc rozpoczęcia i zakończenia haftowania co skutkowało przeszyciem nicią nieprzewodzącą całości modelu wzduż jego promienia.

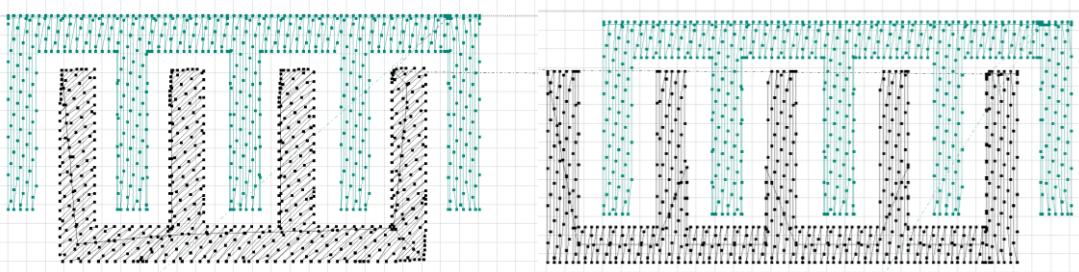


Rys. 3.18. Gotowy haft spiralnego czujnika pojemnościowego

Model ten działał na zasadzie pojemności wzajemnej między współosiowo rozmieszczonymi ramionami spiral. Zmierzona pojemność układu wyniosła 31 pF. Uzyskana

wartość potwierdziła skuteczność geometrii spiralnej jako czujnika zbliżeniowego w zakresie pracy z układami pomiarowymi.

W drugim wariantie zastosowano klasyczną strukturę grzebieniową symetryczną i niesymetryczną, w której dłuższy grzebień miał długość 50 mm, a krótszy 38 mm (rys. 3.19).



Rys. 3.19. Projekt grzebieniowego czujnika pojemnościowego: symetrycznego i niesymetrycznego

Długość pojedynczych zębów określono na 18 mm, przy odstępie między zębami równym 3 mm. Odległość między dwoma grzebieniami ustawionymi naprzeciw siebie wynosiła 2 mm. Zgodnie z modelem teoretycznym mikrostruktur grzebieniowych, pojemność takiej struktury zależna jest od długości nakładania się i liczby zębów oraz odległości pomiędzy nimi. Wykonany haft nieco odbiega od projektu (rys. 3.20).

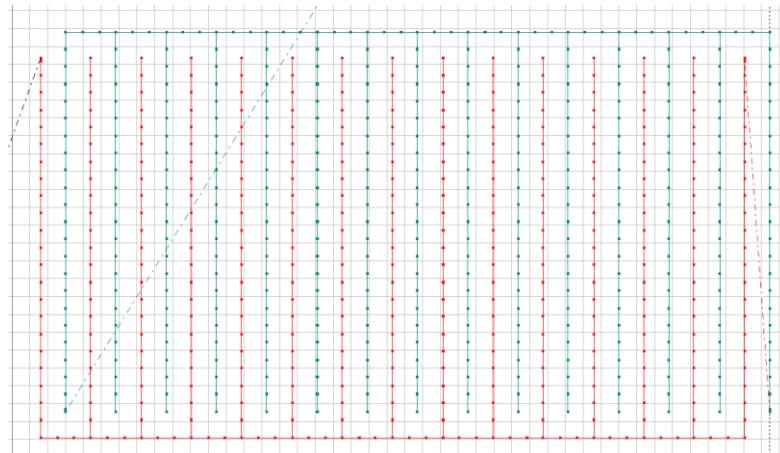


Rys. 3.20. Gotowy haft pojemnościowych czujników grzebieniowych

Wykonanie haftu ograniczone było przez właściwości nici SilverTech – ze względu na jej dużą średnicę, możliwości hafciarki okazały się niewystarczające do precyzyjnego odwzorowania powierzchni wąskich zębów. Jak zauważono, powierzchnia zębów jest mniejsza niż projektowana, a niejednorodność haftu wpływa na efektywną powierzchnię przewodzącą. Niejednorodność spowodowana była również w tym przypadku przez błędne określenie rozpoczęcia i zakończenia miejsca haftowania.

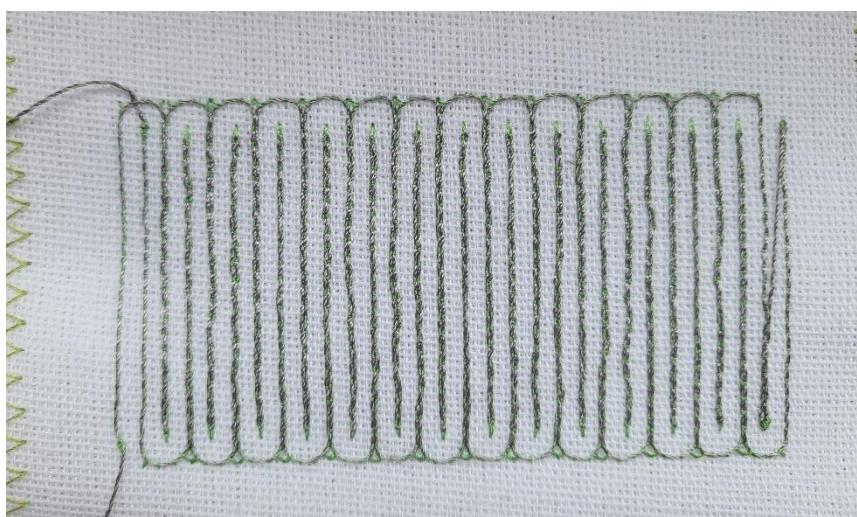
Zmierzona wartość pojemności wyniosła 5,15 pF dla struktury symetrycznej oraz 5,56 pF dla niesymetrycznej. Wynik ten potwierdził zasadność zastosowania struktury grzebieniowej w zastosowaniach dotykowych, zwłaszcza tam, gdzie wymagane są niskie pojemności bazowe i duża rozdzielcość detekcji.

Trzeci wariant to czujnik wykonany w postaci cienkiego grzebienia o długości grzebienia 80 mm oraz długości zębów 44 mm. Odstęp między zębami wynosił 3 mm, a szerokość ścieżki odpowiadała szerokości nici (rys. 3.21).



Rys. 3.21. Projekt grzebieniowego czujnika pojemnościowego niesymetrycznego cienkiego

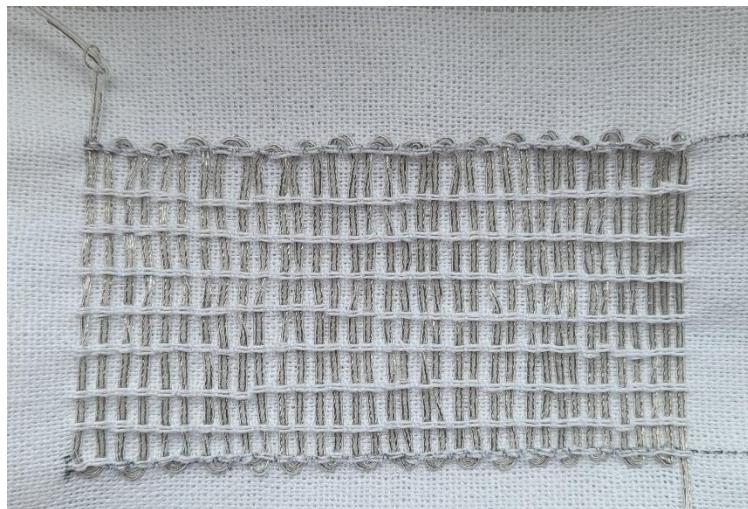
Haft został wykonany poprawnie, niestety również w tym przypadku błędnie określono miejsce rozpoczęcia i zakończenia haftowania, co skutkowało przeszyciem struktury. Na rysunku 3.22 wyraźnie widać, że jeden z końców ścieżek został zwarty – konieczne było jego fizyczne rozdzielenie przed rozpoczęciem pomiarów.



Rys. 3.22. Gotowy haft pojemnościowego czujnik grzebieniowego symetrycznego cienkiego

Co istotne, zmierzona wartość pojemności wyniosła $76 \mu\text{F}$, co przekracza spodziewane wartości i może skutkować uniemożliwieniem detekcji zmian.

Czwarty wariant to czujnik zrealizowany poprzez ułożenie dwóch równoległych odcinków nici Shieldex 117/17 2-ply HC + B TPU, o długości 75 mm i rozstawie 40 mm, przyszytych ręcznie do podłożu tekstylnego (rys 3.23). Nić wykonana została z poliamidu pokrytego srebrem, z dodatkową powłoką TPU, zapewniającą izolację i zwiększoną odporność mechaniczną. Wersja użyta w eksperymencie miała rezystywność $<300 \Omega/\text{m}$ oraz średnicę zbliżoną do AWG 32–30.



Rys. 3.23. Gotowy haft pojemnościowego czujnika o strukturze liniowej

Jakość wykonania wyraźnie odbiega od dokładności haftów maszynowych natomiast struktura jest w pełni odwzorowana. W wyniku pomiaru pojemność układu oszacowano na $61,7 \text{ pF}$. Przed pomiarem odnotowano konieczność usunięcia izolacji z końcówek nici, aby uzyskać dostęp do rdzenia przewodzącego. Otrzymany wynik wskazuje na wysoką efektywność pola elektrostatycznego i predysponuje tę strukturę do zastosowań z układami pomiarowymi bez konieczności dodawania kondensatorów offsetowych.

3.4. Podsumowanie i wnioski

W ramach części praktycznej pracy zaprojektowano oraz zrealizowano układ tekstylnego identyfikatora RFID zintegrowanego z czujnikiem pojemnościowym, działający w paśmie HF ($13,56 \text{ MHz}$) i zgodny ze standardem ISO 15693 (NFC-V). Układ ten wykorzystuje mikrokontroler RF430FRL152H firmy Texas Instruments, który w trybie pasywnym umożliwia wykonywanie pomiarów napięcia z kanału analogowego. Opracowano także dedykowaną antenę spiralną wykonaną techniką haftu przy użyciu nici przewodzących,

której parametry zostały dobrane w celu zapewnienia rezonansu elektromagnetycznego i efektywnej komunikacji z urządzeniem mobilnym.

Antena haftowana wykazała pełną funkcjonalność pomimo relatywnie dużej rezystancji nici, co sugeruje, że rozwiązania oparte na przewodzących przedzach mogą być z powodzeniem stosowane w układach pasywnych NFC przy zachowaniu odpowiednich parametrów geometrycznych.

W zakresie projektowania czujników pojemnościowych wykonanych techniką haftu przewodzącego zaobserwowano istotny wpływ konstrukcji geometrycznej oraz właściwości materiałowych na ich parametry elektryczne.

Problemy i niepowodzenie nawiązania połączenia z dedykowanym przetwornikiem pojemnościowym mogą wskazywać na ograniczenia współpracy układu RF430RFL152H z przetwornikami wysokonapięciowymi.

4. Pomiary

4.1. Wprowadzenie

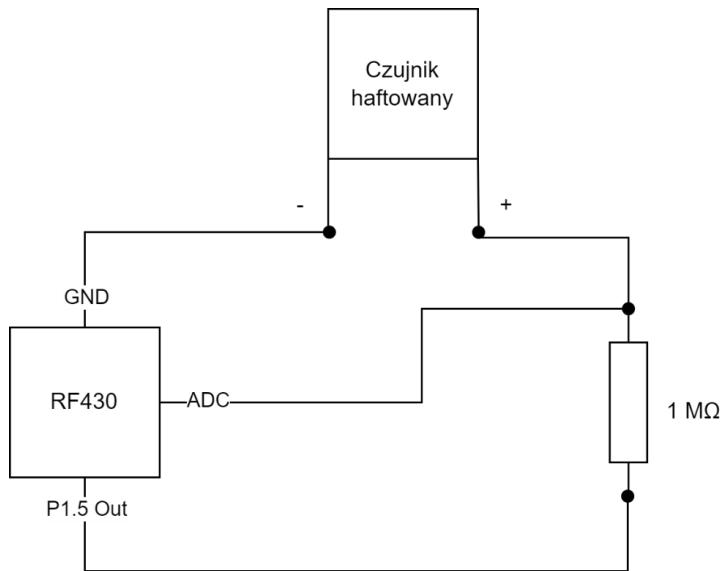
Celem niniejszej części pracy jest przeprowadzenie analizy parametrów wybranych czujników pojemnościowych, wykonanych w technologii haftu przewodzącego. Badania zostały zrealizowane przy użyciu zaprojektowanego wcześniej systemu pomiarowego, opartego na układzie RF430FRL152H firmy Texas Instruments, pełniącym funkcję zdalnego przetwornika analogowo-cyfrowego z komunikacją w standardzie ISO 15693 (NFC-V). Układ został odpowiednio zaprogramowany w celu umożliwienia zdalnego odczytu wartości pomiarowych bez potrzeby zasilania przewodowego, co czyni go szczególnie przydatnym w zastosowaniach mobilnych i ubieralnych.

Pomiary zostały przeprowadzone z wykorzystaniem opracowanej w ramach niniejszej pracy aplikacji mobilnej na system Android, umożliwiającej bezpośrednią komunikację z układem RFID, rejestrację danych pomiarowych oraz ich wizualizację w czasie rzeczywistym. Aplikacja ta, działająca w oparciu o technologię NFC, umożliwia wysyłanie niestandardowych komend oraz interpretację odpowiedzi zawierających zakodowane wartości napięcia, odpowiadające zmianom pojemności badanych struktur haftowanych.

Ze względu na brak dostępu do dedykowanego układu pomiarowego umożliwiającego bezpośredni odczyt rzeczywistych wartości pojemności z wykorzystaniem czujnika FDC1004, podjęto decyzję o przeprowadzeniu pomiarów zastępczych z użyciem prostego układu RC. Celem tego podejścia było zrealizowanie minimalnego zakresu badań eksperymentalnych pozwalających na weryfikację podstawowej funkcjonalności systemu oraz ocenę poprawności komunikacji i rejestrowania wyników pomiarowych. Pomiar pośredni w układzie RC, choć nie pozwala na uzyskanie precyzyjnych wartości bezwzględnych, umożliwia ocenę zmian charakterystycznych dla obciążenia pojemnościowego i pozwala wykazać działanie opracowanego oprogramowania w warunkach zbliżonych do rzeczywistych.

4.2. Wykonanie pomiarów

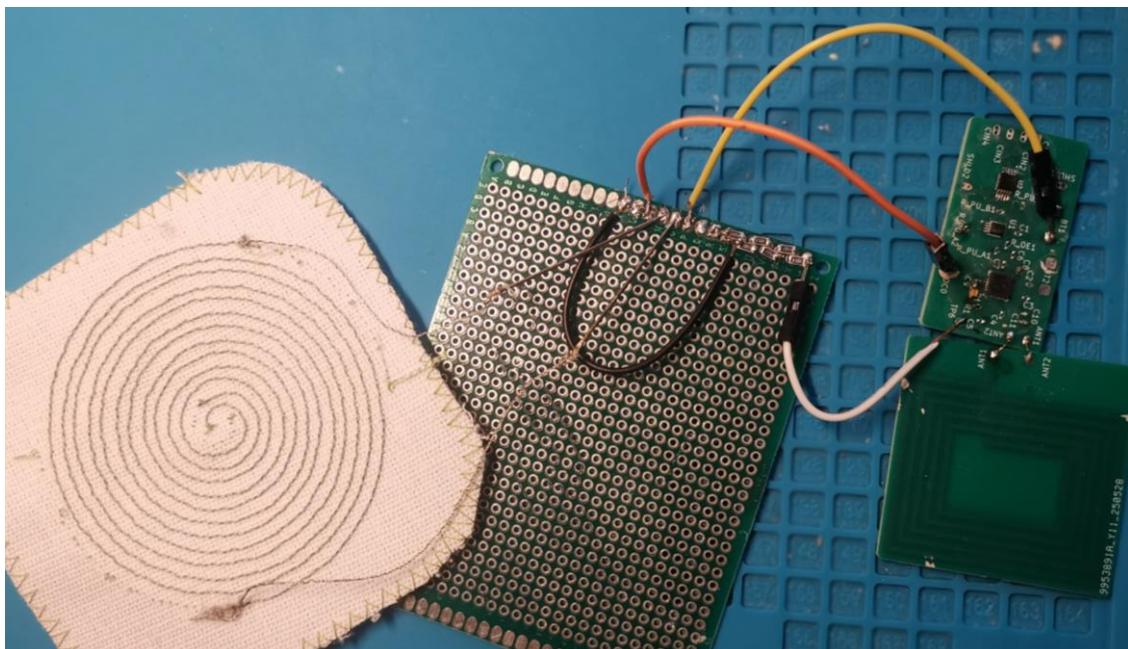
W ramach badania wykorzystano układ złożony z rezystora o znanej rezystancji $R = 1 \text{ M}\Omega$ oraz czujnika pojemnościowego, pełniącego rolę kondensatora. Oba elementy zostały połączone szeregowo, tworząc klasyczny układ RC (rys. 4.1).



Rys. 4.1. Uproszczony schemat układu pomiarowego

Celem badania było wyznaczenie napięcia na kondensatorze w chwili ustalonego czasu t po rozpoczęciu jego ładowania, a w konsekwencji — pośrednia ocena pojemności czujnika na podstawie analizy czasowej.

Układ RC został zasilony napięciem z wyprowadzenia GPIO P1.5 o wartości 0,258 V w wyniku zastosowania dzielnika napięcia, natomiast kondensator był podłączony bezpośrednio do wejścia przetwornika analogowo-cyfrowego SD14 (wyprowadzenie ADC0). Drugą elektrodę kondensatora oraz masę rezystora podłączono do wspólnej masy układu RF430FRL152H (rys. 4.2).



Rys. 4.1. Schemat pomiarowy

Aby dokonać pomiaru napięcia $V_C(t)$ na kondensatorze w chwili t , zastosowano procedurę:

- rozładowania kondensatora poprzez krótkie zwarte połączenie do masy;
- rozpoczęcia ładowania poprzez podanie napięcia zasilającego na szeregowe połączenie R-C;
- wykonania pomiaru napięcia na kondensatorze za pomocą przetwornika SD14 w trybie unipolarnym z konfiguracją: filtr CIC, współczynnik oversamplingu: CIC128, wzmacnienie programowe: $\times 2$, napięcie odniesienia: V_{REF} (domyślne 0,9 V).

Podczas ładowania kondensatora przez rezystor, napięcie na jego zaciskach zmienia się zgodnie z wykładniczą zależnością:

$$V_C(t) = V_{max} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (4.1)$$

gdzie: $V_C(t)$ – napięcie na kondensatorze w chwili czasu t , V_{max} – napięcie końcowe (maksymalne) osiągane po pełnym naładowaniu, R – znana wartość rezystancji, C – szacowana wartość pojemności, t – czas od rozpoczęcia ładowania.

Charakterystyczną właściwością tego procesu jest to, że napięcie osiąga 63% wartości maksymalnej po czasie równym stałej czasowej układu $\tau = RC$. W związku z tym, znając wartość rezystora oraz czas, w którym napięcie osiąga poziom $0,63 \cdot V_{max}$, możliwe jest wyznaczenie pojemności ze wzoru:

$$C = \frac{t}{R} \quad (4.2)$$

Pomiary napięcia zostały przesłane do urządzenia mobilnego przez interfejs NFC. Następnie wyeksportowano dane i zainportowano je do arkusza kalkulacyjnego. Z otrzymanych wyników trudno wyznaczyć dokładny czas ładowania ze względu na rozdrobnienie pomiarów, która zależy od szybkości konwertowania i wymiany danych między mikrokontrolerem a smartfonem. Udało się osiągnąć czas 30 ms między kolejnymi punktami pomiarowymi przy zachowaniu minimalnej dokładności, co oznacza że przy zastosowaniu rezystora $R = 1 \text{ M}\Omega$ metoda ta może mierzyć poprawnie pojemności powyżej $30 \mu\text{F}$. Jest to zdecydowanie za mała czułość pomiarowa dla większości przygotowanych czujników pojemnościowych z wyjątkiem czujnika grzebieniowego niesymetrycznego cienkiego. Poniżej przedstawiono obliczenia szacowanej pojemności tego czujnika.

Dla napięcia zasilania $V_{max} = 0,258 \text{ V}$ wyznaczono wartość 63%, które oznacza $V_C(t)$ następnie oszacowano czas ładowania t czujnika, które wyniosło 80 ms.

Dalej dla czujnika grzebieniowego niesymetrycznego cienkiego wyznaczono pojemność:

$$C = \frac{t}{R} = \frac{80 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^6} = 80 \mu\text{F}$$

Rzeczywista zmierzona wartość pojemności tego czujnika wyniosła $75,6 \mu\text{F}$, tak więc błąd pomiarowy tej metody wyniósł około 5,5 %.

4.3. Wnioski

Przeprowadzona procedura badawcza potwierdziła możliwość wykorzystania układu RF430FRL152H do pośredniego pomiaru pojemności z wykorzystaniem klasycznego układu RC oraz przetwornika analogowo-cyfrowego SD14. Pomimo ograniczeń związanych z rozdzielczością czasową pomiarów wynikających z technologii NFC i interfejsu komunikacyjnego, uzyskano satysfakcyjujące wyniki dla większych wartości pojemności, takich jak w przypadku czujnika grzebieniowego.

Największą trudność stanowi uzyskanie odpowiednio krótkiego odstępu czasowego między pomiarem a początkiem ładowania kondensatora. Przy zachowanej częstotliwości próbkowania rzędu 30 ms możliwe było jedynie szacowanie pojemności o wartości powyżej kilkudziesięciu mikrofaradów. Dla niższych pojemności metoda ta traci dokładność, co wskazuje na konieczność skrócenia odstępu czasowego lub zmiany podejścia pomiarowego.

Pomimo tego, dla jednego z testowanych czujników — czujnika grzebieniowego niesymetrycznego cienkiego — uzyskano szacowaną wartość pojemności równą $80 \mu\text{F}$, co przy rzeczywistym pomiarze $75,6 \mu\text{F}$ daje błąd rzędu 5%. Potwierdza to poprawność koncepcji oraz możliwość wykorzystania układu RF430FRL152H do tego typu pomiarów, pod warunkiem odpowiedniego doboru elementów R i C oraz znajomości ograniczeń czasowych związanych z komunikacją NFC. Metoda ta może być stosowana w przypadku czujników o stosunkowo dużej pojemności, natomiast dla czujników o pojemnościach rzędu pojedynczych pikofaradów konieczne byłoby zastosowanie alternatywnego podejścia, np. z użyciem przetworników pojemnościowo-cyfrowych lub częstotliwościowych.

5. Podsumowanie

Celem niniejszej pracy było zaprojektowanie i wykonanie tekstylnego identyfikatora RFID zintegrowanego z czujnikiem pojemnościowym, działającego w standardzie NFC i umożliwiającego bezbaterijną komunikację z urządzeniami mobilnymi. W części teoretycznej omówiono zagadnienia związane z techniką RFID, antenami tekstylnymi, przewodzącymi przedzami oraz czujnikami pojemnościowymi, co pozwoliło na świadomy dobór rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych.

W ramach części praktycznej wykonano prototyp tekstylnej anteny spiralnej metodą haftu oraz zaprojektowano struktury czujnikowe, które zintegrowano z układem RF430FRL152H na podłożu elasatycznym. Uzyskano poprawne działanie układu RFID – komunikacja z wykorzystaniem technologii NFC przebiegała stabilnie, a odczyt danych z poziomu smartfona był możliwy bez konieczności stosowania zewnętrznego zasilania. Projekt potwierdził więc możliwość budowy elastycznego, tekstylnego identyfikatora w pełni zgodnego z wymaganiami pasywnych systemów RFID.

Jednocześnie należy zauważyć, że w badaniach laboratoryjnych nie udało się zarejestrować wyraźnych zmian pojemności czujnika w odpowiedzi na bodźce środowiskowe, takie jak nacisk czy wilgotność. Przyczyną tego jest brak intergracji dedykowanego przetwornika pojemnościowego. Pomimo tego, wyniki uzyskane z wykorzystaniem wbudowanego przetwornika dostarczają istotnych informacji dotyczących dalszego kierunku rozwoju.

Wnioskiem z przeprowadzonej pracy jest potwierdzenie, że integracja funkcjonalnej anteny RFID z materiałem tekstylnym jest możliwa i może stanowić podstawę do budowy systemów ubieralnych. Dalsze badania powinny koncentrować się na poprawie konstrukcji czujników, zastosowaniu bardziej reaktywnych materiałów dielektrycznych oraz zwiększeniu dokładności toru pomiarowego. Należało by też dokładniej przeanalizować działanie układu RF430RFL152H z przetwornikami wysokonapięciowymi. Praca ta stanowi zatem punkt wyjścia do rozwijania tekstylnych, pasywnych układów pomiarowo-identyfikacyjnych zdolnych do pracy w rzeczywistych warunkach użytkowych.

Autor za wkład własny pracy uważa:

- 1) przegląd rozwiązań, zapoznanie z dostępną literaturą i dokumentacjami,
- 2) dobór koncepcji rozwiązania,
- 3) dobór i implementacja układu RFID (RF430FRL152H),
- 4) schemat i projekt płytki PCB układu RF430RFL152H z FDC1004,
- 5) projekt geometryczny struktur czujnika pojemnościowego i anteny,
- 6) przeprowadzenie testów funkcjonalnych prototypu,
- 7) analizę przyczyn niepowodzeń.

LITERATURA

- [1] Finkenzeller K., *RFID Handbook*. John Wiley & Sons, 2010.
- [2] Xiang J., *Radio Frequency Identification (RFID) on Textiles*. The Ohio State University, 2019.
- [3] Liu Y., Ye T.T., *Coupled Planar Coil (CPC) Antenna as a Displacement Sensor for NFC or HF RFID Tags*. IEEE, 2020.
- [4] Texas Instruments, *NFC/RFID Interface with Sensor Front End (RF430FRL15xH)*. Application Report SLOA212A, 2014.
- [5] Luo C., Fernández-García R., Gil I., *Embroidered Textile Capacitive Sensor for Sucrose Solutions Measurement*. IEEE, 2020.
- [6] Del-Rio-Ruiz R., Lopez-Garde J.-M., Legarda J., Rogier H., *Design and Performance Analysis of a Purely Textile Spiral Antenna for On-Body NFC Applications*. IEEE IMWS-AMP, 2017.
- [7] Tao X. (red.), *Handbook of Smart Textiles*. Springer, 2015.
- [8] Tabor J., Venkataraman N., Taylor A. L., Abraham L. D., Huang X., *Textile-Based Pressure Sensors for Monitoring Prosthetic-Socket Interfaces*. IEEE Sensors Journal, 2021.
- [9] Su H., Zuo Y., Zhou Y., Liu H., Li M., Yang H., *Textile-Based Flexible Capacitive Pressure Sensors: A Review*. Nanomaterials, 2022.
- [10] Zhang K., Li Z., Meng Z., Zhou W., Gao N., Zhang Z., *UHF-HF Integrated RFID Sensor: A Novel Information Interface for Industrial Integration*. IEEE Sensors Journal, 2022.
- [11] Qian X., Li Z., Meng Z., Gao N., Zhang Z., *Flexible RFID Tag for Sensing the Total Minerals in Drinking Water via Smartphone Tapping*. IEEE Sensors Journal, 2020.
- [12] Su H., Zuo Y., Zhou Y., Liu H., Li M., Yang H., *Textile-Based Flexible Capacitive Pressure Sensors: A Review*. Nanomaterials, 2022.
- [13] Smołka K., *Modele pojemnościowe mikrostruktur grzebieniowych*. XIII Międzynarodowe Sympozjum Mikroelektromechaniki i Serwonapędów, Krasiczyn, 2002.
- [14] Salmerón J.F., Rivadeneira A., Agudo-Acemel M., Capitan-Vallvey L.F., Banqueri J., Carvajal M.A., Palma A.J., *Printed Single-Chip UHF Passive Radio Frequency Identification Tags with Sensing Capability*. Sensors and Actuators A: Physical, 2019.
- [15] Gleskova H., Martinez-Estrada M., Yang J., *Optimization of All-Textile Capacitive Sensor Array for Smart Chair*. IEEE, 2022.
- [16] <https://github.com/travisgoodspeed/goodtag>, dostęp 02.04.2025.
- [17] <https://www.ti.com/lit/ds/sces640j/sces640j.pdf>, dostęp 15.05.2025.

- [18] RF430FRL15xH NFC ISO 15693 Sensor Transponder datasheet (Rev. C)
- [19] RF430FRL15xH Firmware User's Guide (Rev. B)
- [20] <https://github.com/travisgoodspeed/GoodV>, dostęp 03.04.2025.
- [21] RF430FRL15xH NFC and ISO/IEC 15693 Sensor Transponder Practical Antenna Design
(Rev. A)
- [22] RF430FRL15xH Family Technical Reference Manual

Sygnatura:

POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. I. Łukasiewicza
Wydział Elektrotechniki i Informatyki

Rzeszów, 2025

STRESZCZENIE PRACY DYPLOMOWEJ MAGISTERSKIEJ

TEKSTRONICZNY IDENTYFIKATOR RFID Z CZUJNIKIEM POJEMNOŚCIOWYM

Autor: Karol Bulanowski, nr albumu: ET/E-DU-167684

Opiekun: dr hab. inż. Mariusz Węglarski

Słowa kluczowe: RFID, Tektronika, HF, NFC, czujnik, antena tekstylna, identyfikator

Tematem pracy było zaprojektowanie i wykonanie tekstylnego identyfikatora RFID zintegrowanego z czujnikiem pojemnościowym, działającego w paśmie HF i zgodnego ze standardem NFC. Wykonano prototyp haftowanej anteny oraz struktur czujnikowych i połączono je z układem RF430FRL152H. Mimo poprawnej komunikacji z urządzeniem mobilnym, nie udało się jednoznacznie zarejestrować zmian pojemności. Opracowany układ stanowi podstawę do dalszych prac nad tekstylnymi czujnikami ubieralnymi.

RZESZOW UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Faculty of Electrical and Computer Engineering

Rzeszow, 2025

DIPLOMA THESIS (MS) ABSTRACT

TEXTRONIC RFID TAG WITH A CAPACITIVE SENSOR

Author: Karol Bulanowski, code: ET/E-DU-167684

Supervisor: Mariusz Węglarski, PhD, Eng.

Key words: RFID, NFC, Textronics, Wearable electronics, Capacitive sensor, Textile antenna, passive tag

The subject of this thesis was the design and development of a textile RFID tag with an integrated capacitive sensor, operating in the HF band and compliant with the NFC standard. A prototype was created using an embroidered antenna and sensor structures connected to the RF430FRL152H chip. Although communication with a mobile device was successful, capacitance changes were not clearly detected. The developed system forms a basis for further work on wearable textile sensors.