

Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej

Projekt dyplomowy

*Internetowa stacja pogodowa*

*Internet weather station*

Autor: *Jan Pomykacz*

Kierunek studiów: Automatyka i Robotyka

Opiekun pracy: *dr inż. Krzysztof Kołek*

Kraków, 2023

Spis treści

[1 Wstęp 5](#_Toc122268172)

[2 Zagadnienie pomiarów meteorologicznych 5](#_Toc122268173)

[2.1 Charakterystyka wybranych urządzeń pomiarowych 5](#_Toc122268174)

[2.1.1 Termometr 5](#_Toc122268175)

[2.1.2 Barometr 6](#_Toc122268176)

[2.1.3 Higrometr 6](#_Toc122268177)

[2.1.4 Anemometr i anemoskop 7](#_Toc122268178)

[2.1.5 Pluwiograf 7](#_Toc122268179)

[2.2 Internet rzeczy w pomiarach pogody 8](#_Toc122268180)

[2.2.1 Architektura Internetu rzeczy 8](#_Toc122268181)

[2.2.2 Zastosowania Internetu rzeczy 9](#_Toc122268182)

[2.3 Stacje pogodowe – przegląd dostępnych rozwiązań. 10](#_Toc122268183)

[2.3.1 Stacje niekomercyjne i amatorskie 10](#_Toc122268184)

[2.3.2 Stacje komercyjne 12](#_Toc122268185)

[3 Warstwa sprzętowa 14](#_Toc122268186)

[3.1 Czujnik temperatury i wilgotności 14](#_Toc122268187)

[3.2 Czujnik temperatury i ciśnienia 15](#_Toc122268188)

[3.3 Nadajnik - odbiornik radiowy 17](#_Toc122268189)

[3.4 Moduł Wifi 18](#_Toc122268190)

[3.5 Mikrokontrolery 19](#_Toc122268191)

[3.5.1 NUCLEO-F401RE 19](#_Toc122268192)

[3.5.2 BlackPill 21](#_Toc122268193)

[3.6 Zasilanie 21](#_Toc122268194)

[3.7 Schematy połączeń i wykonanie fizyczne 22](#_Toc122268195)

[4 Oprogramowanie 25](#_Toc122268196)

[4.1 Środowisko programistyczne 25](#_Toc122268197)

[4.2 Biblioteka czujnika wilgotności i temperatury 25](#_Toc122268198)

[4.3 Biblioteka czujnika ciśnienia i temperatury 27](#_Toc122268199)

[4.4 Biblioteka nadajnika i odbiornika radiowego 28](#_Toc122268200)

[4.5 Biblioteka modułu Wifi 32](#_Toc122268201)

[4.6 Główna program 33](#_Toc122268202)

[5 Analiza uzyskanych wyników 35](#_Toc122268203)

[Literatura 36](#_Toc122268204)

# Wstęp

# Zagadnienie pomiarów meteorologicznych

Meteorologia jest nauką badającą zjawiska i procesy fizyczne zachodzące w atmosferze. Przewidywanie pogody to jedno z ważniejszych zagadnień w wyżej wspomnianej dziedzinie. Warunki atmosferyczne potrafią bardzo szybko ulegać zmianom, niejednokrotnie w niewielkim obszarze geograficznym. Aby zapewnić jak najdokładniejszą prognozę pogody pomiary jej składników powinny być realizowane lokalnie i odpowiednio często.

Pomiarami i akwizycją danych pogodowych zajmują się stacje meteorologiczne. Mogą to być zarówno placówki badawcze, w których prowadzi się także analizę zmierzonych wielkości, jak i automatyczne stacje pomiarowe. Zazwyczaj stacje pogodowe posiadają przyrządy do pomiaru następujących warunków atmosferycznych: temperatury i wilgotności powietrza, ciśnienia atmosferycznego, kierunku i prędkości wiatru, oraz ilości opadów. Zakres mierzonych zjawisk zależy od stopnia zaawansowania stacji odpowiedzialnej za pomiar.

## Charakterystyka wybranych urządzeń pomiarowych

Zagadnienie pomiaru wielkości fizycznych, w tym także procesów zachodzących w atmosferze, jest bardzo rozległe i nie będzie tutaj szczegółowo opisane. Skupiono się na powierzchownym opisaniu najczęściej występujących rodzajów czujników elektrycznych w stacjach pogodowych.

### Termometr

Zazwyczaj w stacjach pogodowych wykorzystuje się rezystancyjne czujniki temperatury (RTD – ang. Resistance Temperature Detector), termistory bądź termopary. Czujniki RTD i termistory zmieniają swą rezystancję wraz ze zmianą temperatury, natomiast termopara opiera się na zjawisku Seebecka [1].

W pierwszym z wymienionych sensorów najczęściej wykorzystuje się platynę lub jej stopy ze względu na liniową zależność oporu elektrycznego od temperatury, stabilność fizyczną i chemiczną oraz stabilną charakterystykę na przestrzeni około dwóch lat [1].

W termistorach wykorzystuje się materiały półprzewodnikowe, co sprawia, że zależność rezystancji od temperatury staje się mocno nieliniowa. Ich zaletą jest duża dokładność i redukcja wpływu oporu przewodów na wynik pomiaru, natomiast do wad należy podatność na przegrzewanie [1].

Termopary w meteorologii zazwyczaj tworzy się z połączeń miedź – konstantan i żelazo – konstantan. Mają niską stałą czasową i potrafią dawać bardzo dokładne pomiary, natomiast wymagają stałej temperatury odniesienia, oraz częstej kalibracji [1].

### Barometr

Większość barometrów elektronicznych korzysta z przetworników, które zamieniają wielkość związaną z ciśnieniem na określoną wielkość elektryczną (sygnały zarówno analogowe, jak i cyfrowe). Obecnie przy produkcji cyfrowych czujników ciśnienia stosuje się pewną ilość redundancji, aby zapewnić długotrwałą stabilność i poprawność pomiarów. Do pomiarów ciśnienia atmosferycznego najczęściej stosuje się czujniki piezoelektryczne, przetworniki oparte o odkształcenie aneroidu oraz rezonatory cylindryczne [1].

Pierwszy z czujników oparty jest na efekcie piezoelektrycznym. Zazwyczaj stosuje się tu rezystory połączone w mostek Wheatstona ułożone na podłożu krzemowym. Ciśnienie atmosferyczne powoduje odkształcenie się podłoża, a jednocześnie zmianę wartości oporu elektrycznego rezystorów. Napięcie odczytane z mostka jest proporcjonalne do różnicy ciśnień (atmosferycznego i przyjętego ciśnienia odniesienia) [1].

Barometry elektroniczne oparte o odkształcenie aneroidu działają poprzez zamianę przemieszczenia tego mechanizmu pod wpływem ciśnienia na sygnał elektryczny. Stosowane są tutaj przetworniki pojemnościowe, potencjometryczne i tensometryczne. Aby czujnik poprawnie działał należy spełnić rygorystyczne wymogi m.in. zapobiec kondensacji pary wodnej w komorze czujnika, utrzymywać czujnik w stałej temperaturze [1].

Rezonatory cylindryczne posiadają cienkościenny cylinder wykonany z niklu. Do jego wnętrza wprowadza się powietrze o ciśnieniu atmosferycznym, natomiast na zewnątrz od niego panuje próżnia. Wraz ze wzrostem różnicy ciśnień następuje wzrost częstotliwości rezonansowej cylindra, a jego wibracje są wykrywane za pomocą cewki [1].

Opisane wyżej barometry osiągają podobną dokładność ok. 0.1 hPa. Dla każdego z nich należy uwzględnić kompensację temperatury i konieczność okresowej kalibracji [1].

### Higrometr

Elektroniczne czujniki wilgotności oparte są o higroskopijne materiały, których właściwości elektryczne zmieniają się wraz ze zmianą wilgotności względnej powietrza. Większość sensorów tego typu posiada nieliniowe charakterystyki, co stwarza wymóg dodatkowego przetwarzania danych pomiarowych. Czujniki te dzielą się na rezystancyjne i pojemnościowe [1].

Rezystancyjne czujniki wilgotności względnej wytwarzane są z polimerów posiadających przewodzącą powierzchnię nałożoną na nieprzewodzące podłoże. W procesie adsorpcji higroskopijny rezystancja materiału przewodzącego maleje eksponencjalnie w stosunku do wilgotności powietrza [1].

W pojemnościowych czujnikach wilgotności względnej również wykorzystuje się polimery, jednakże tutaj służą one jako dielektryk kondensatora. W procesie adsorpcji zmienia się charakterystyka polimeru, co w efekcie przekłada się na zmianę pojemności kondensatora. Należy uwzględnić wpływ temperatury środowiska na działanie tego typu czujników [1].

### Anemometr i anemoskop

Anemometr i anemoskop służą kolejno do pomiaru prędkości i kierunku wiatru. Częstym rozwiązaniem jest integrowanie tych dwóch urządzeń w jedno. Wśród anemometrów jednymi z najbardziej popularnych są wiatromierze wiatrakowe i czaszowe, natomiast wiatrowskazy różnią się od siebie bardzo nieznacznie [1].

Anemometry wiatrakowe i czaszowe składają się z dwóch części: rotora i generatora sygnału. W przypadku pierwszego z czujników prędkość obrotowa wirnika jest wprost proporcjonalna do prędkości wiatru, zaś w przypadku drugiego zależność zachodzi między składową prędkości wiatru równoległą do osi obrotu wiatraka. Prędkość obrotowa w łatwy sposób może zostać zamieniona na sygnał elektryczny. Większość tego typu anemometrów szybciej reaguje na zwiększenie prędkości wiatru niż na jej zmniejszenie, oraz jest podatna na pionowe fluktuacje prędkości powietrza. Pozbycie się tych problemów odbywa się na drodze konstrukcyjnej [1].

Wiatrowskazy to proste urządzenia mechaniczne, skonstruowane tak, aby obrócić się równolegle do kierunku wiatru. Kluczowym jest dobre zbalansowanie przyrządu oraz dokładność z jaką wskazuje on biegun geograficzny północny. Zamianę pomiaru kąta na wielkość elektryczną można uzyskać za pomocą m.in. potencjometru, enkodera, (rzadziej) selsynu itp.[1]

### Pluwiograf

Pluwiografy, czyli deszczomierze automatyczne, umożliwiają ciągły pomiar opadu atmosferycznego. Ich zaletą w stosunku do przyrządów manualnych jest lepsza rozdzielczość czasowa pomiarów, a także kompensują straty wynikające z parowania oraz przylegania części opadu do przyrządu pomiarowego (wetting losses). Najczęstsze w użyciu są pluwiografy wagowe, wywrotkowe i pływakowe[1]

Deszczomierz wagowy jako jedyny z trzech wymienionych umożliwia pomiar dowolnego typu opadu, pozostałe dwa działają tylko dla deszczu. Zazwyczaj jest to pojemnik, którego waga wraz z zebranym w nim opadem atmosferycznym obciąża mechanizm sprężynowy. Odkształcenie sprężyny jest następnie zamieniane na wielkość elektryczną. Zbiornik nie posiada mechanizmu opróżniania, dlatego nie jest zalecane stosowanie tego typu czujników w miejscach z obfitymi opadami atmosferycznymi [1]

W pluwiografie wywrotkowym zamontowane są dwa niewielkie zbiorniki. Ich konstrukcja mechaniczna umożliwia tylko jednemu z nich na akumulację opadu. Napełnienie pojemnika powoduje przesunięcie środka masy układu z dala od punktu równowagi, pełny zbiornik jest opróżniany, a zaś drugi, pusty do tej pory, ustawiany jest w pozycji pozwalającej na dalszy pomiar. Każde opróżnienie zbiornika odpowiada jednemu impulsowi elektrycznemu, który jest rejestrowany. Taki sposób działania wprowadza pewien błąd systematyczny do układu, natomiast są sposoby jego kompensacji [1]

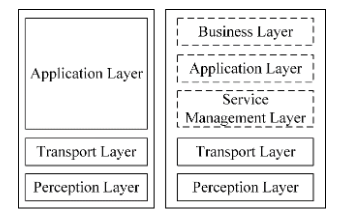
Pluwiograf pływakowy składa się z komory pływakowej i lekkiego pływaka. Wlewający się do komory deszcz powoduje unoszenie się pływaka na powierzchni wody, a ruch ten jest przekazywany przez odpowiedni mechanizm do przetwornika cyfrowego. Aby uniknąć przepełnienia zbiornika stosuje się lewary hydrauliczne. W przypadku stosowania w obszarze, gdzie opad może zamarznąć w komorze montowane są grzałki, które temu zapobiegają. Muszą one pracować na minimalnej mocy, aby zbyt duża temperatura nie zwiększyła tempa parowania wody [1].

## Internet rzeczy w pomiarach pogody

Termin „Internet rzeczy” (ang. Internet of Things, IoT) określa obiekty posiadające czujniki, oprogramowanie lub inne technologie pozwalające na interakcję z fizycznym światem, które dodatkowo potrafią łączyć się i wymieniać dane między sobą za pośrednictwem Internetu, bądź innych sieci komunikacyjnych. Ta koncepcja stała się możliwa dzięki równoległemu rozwojowi wielu dziedzin, m.in. systemów wbudowanych, telekomunikacji czy automatyki.

### Architektura Internetu rzeczy

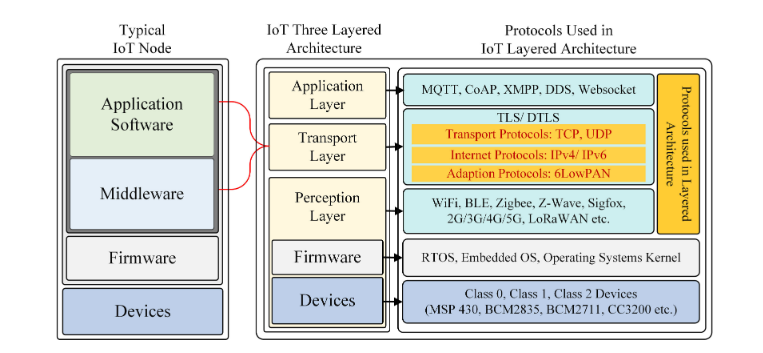
Architektura IoT jest warstwowa. Najczęściej występującymi rodzajami są trójwarstwowa i pięciowarstwowa.



Rysunek 2.1. Architektury IoT: trójwarstwowa i pięciowarstwowa [2].

Charakterystyka powyższych warstw jest następująca [2]:

* Warstwa percepcji jest zbiorem obiektów. Zazwyczaj są to systemy pomiarowe, zajmujące się akwizycją i digitalizacją danych. Każdy obiekt powinien mieć unikalny identyfikator w Internecie rzeczy.
* Warstwa transportowa ma na celu łączenie obiektów i wymianę informacji między nimi. Wykorzystuje się tutaj zarówno technologie przewodowe, jak i bezprzewodowe np. Wi-Fi, Ethernet, ZigBee.
* Warstwa oprogramowania pośredniego głównie odpowiada za przetwarzanie danych pozyskanych z warstwy transportowej.
* Warstwa aplikacji dostarcza aplikacje i usługi pozwalające końcowemu użytkownikowi na korzystanie z funkcjonalności danego systemu IoT.
* Warstwa biznesowa zajmuje się zarządzaniem i kontrolą całego systemu.



Rysunek 2.2. Obrazowe przedstawienie urządzenia w odniesieniu do modelu warstwowego IoT wraz z przykładami używanych technologii [2].

### Zastosowania Internetu rzeczy

Internet rzeczy zyskuje popularność w wielu dziedzinach. Najczęściej wymienia się jego zastosowanie w przemyśle i koncepcji inteligentnego miasta. Oprócz tego stosuje się tą ideę w medycynie, rolnictwie, transporcie czy budownictwie (smart homes) [3].

Zastosowanie IoT w przemyśle ma na celu zwiększenie efektywności procesu produkcyjnego i poprawienie komunikacji między maszynami, a ich operatorami. Możliwa jest również lepsza ocena jakości oraz minimalizacja strat. Badania w tym kierunku są intensywnie prowadzone [3].

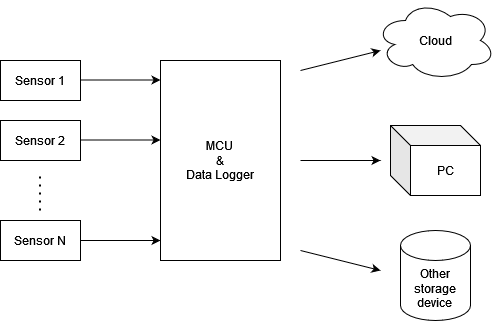
Inteligentne miasto to zurbanizowany obszar, który zbiera określone dane na swój temat i używa ich do zwiększenia efektywności usług i zasobów wykonywanych w takim mieście [4]. IoT może zostać wykorzystany jako dostawca danych z powyższej definicji. Przykładowymi obszarami akwizycji danych są: transport, bezpieczeństwo, detekcja błędów infrastruktury miejskiej [3].

Internet rzeczy znajduje również zastosowanie w rolnictwie. Jednym z nich jest redukcja plonu określonych roślin w związku z postępującymi zmianami klimatycznymi. Monitorowanie obszarów rolniczych może pomóc w walce z chorobami upraw, czy opracowywaniu oszczędnych systemów irygacyjnych. Przekłada się to bezpośrednio na efektywność rolnictwa, większy plon oraz mniejsze zużycie zasobów [3].

## Stacje pogodowe – przegląd dostępnych rozwiązań.

Stacje pogodowe są bardzo zróżnicowane. Powszechnie dostępne w sieci są amatorskie rozwiązania, w sklepach mamy możliwość zakupu rozwiązań komercyjnych z szerokich przedziałów cenowych, o różnych funkcjonalnościach. Profesjonalne stacje spełniające rygorystyczne normy są dostępne w placówkach badawczych zajmujących się meteorologią.

### Stacje niekomercyjne i amatorskie



Rysunek 2.3. Diagram ideowy stacji pogodowej.

Tego typu stacje często są wybierane jako projekty przez początkujących inżynierów i hobbystów IoT. Ich zastosowanie jest edukacyjno – naukowe, w związku z czym nie przykłada się aż takiej uwagi do estetyki wykonania. Zazwyczaj korzysta się z łatwo dostępnych na rynku czujników, układów mikrokontrolerowych ogólnego przeznaczenia, oprogramowania typu open source oraz darmowych technologii bazodanowych i chmurowych.

Popularnymi mikrokontrolerami są układy z rodziny Arduino [5], [6] i Raspberry Pi [7]. Arduino to platforma dla systemów wbudowanych, zazwyczaj opartych o mikroprocesory Atmel AVR, choć nie jest to regułą. Dostępne w sprzedaży płytki zawierają obsługę popularnych interfejsów komunikacyjnych, takich jak UART, SPI, I2C. Posiadają przyjazne użytkownikowi środowisko programistyczne, ciągle rozbudowywane i ogólnie dostępne oprogramowanie, oraz dużą społeczność użytkowników. Dzięki tym cechom są chętnie wybierane przez entuzjastów systemów wbudowanych [8].

Raspberry Pi to komputer zrealizowany na pojedynczej płytce drukowanej. Głównie stosuje się w nich procesory ARM. W zależności od płytki układ może mieć bardzo mało zasobów i układów peryferyjnych, lub bardzo dużo. Komputery te posiadają system operacyjny, zazwyczaj oparty na Linuksie. Są relatywnie tanie, wspierają standard USB oraz pozwalają na budowanie aplikacji opartych o modułową architekturę [9].

Warto wspomnieć o układach z modułem Wi-Fi ESP8266 i oprogramowaniem NodeMCU[10]. Są to nieduże układy, w których procesor został zintegrowany z modułem Wi-Fi. Układ posiada około 10 pinów ogólnego przeznaczenia, obsługuję magistralę I2C oraz 1wire, posiada konwerter USB-UART. Jest kompatybilny z środowiskiem programistycznym Arduino. Wbudowana możliwość połączenia z Internetem przekłada się na dużą popularność tego układu wśród entuzjastów Internetu rzeczy.

Czujnikami w amatorskich stacjach mogą być powszechnie dostępne:

* DHT11[10], DHT22[7] – czujniki temperatury i wilgotności,
* BMP180[6], [7] – czujniki temperatury i ciśnienia,
* BME280[7] – czujnik temperatury, ciśnienia i wilgotności.

Sensor BMP180 firmy Bosch komunikuje się za pomocą interfejsu I2C. BME280, należące do tego samego producenta, posiada dodatkowo interfejs SPI. Czujniki DHT firmy Asair komunikują się jednoprzewodowym interfejsem, przypominającym standard 1wire. Podłączenie takich sensorów do któregoś z powyższych mikrokontrolerów jest bardzo proste, gdyż układy takie mają wsparcie sprzętowe dla wymaganych magistral komunikacyjnych.

Dostęp do Internetu realizuje się najczęściej za pomocą standardu Wi-Fi. Można wykorzystać wspomniany już moduł ESP8266. Komputery Raspberry Pi posiadają wsparcie dla Wi-Fi [7], [9].

Logowanie zmierzonych składników pogody zazwyczaj przeprowadza się w chmurze. Popularne usługi m.in. Thingspeak [10], oraz AWS (Amazon Web Services) [7]. Obydwa serwisy oferują darmowe usługi w ograniczonym zakresie, zazwyczaj wystarczające dla zebrania niewielkiej ilości danych otrzymanych ze stacji pogodowej. Wspierają protokoły HTTP oraz MQTT.

### Stacje komercyjne

Wśród stacji komercyjnych jakość wykonania, dokładność i ilość pomiarów, oraz inne funkcjonalności zależą przede wszystkim od przedziału cenowego. Tanie stacje pogodowe zazwyczaj kosztują od 30 do 100 złotych. Powyżej 500 złotych można zakupić bardzo dobrą stację pogodową, natomiast profesjonalne stacje potrafią kosztować w przybliżeniu 2000 złotych.

Tanie stacje pogodowe zazwyczaj nie posiadają innych pomiarów niż temperatura, wilgotność i ciśnienie. Najtańsze stacje oferują pomiar temperatury i wilgotności, są montowane w plastikowej obudowie z ekranami monochromatycznymi. Często można się spotkać z dodatkowymi funkcjami, takimi jak budzik czy zegar. Droższe modele mają lepszą ergonomię, mogą zawierać czujnik do pomiarów zewnętrznych, algorytm prognozowania pogody, informację o fazie księżyca itp. [11].

Stacje ze średniej półki cenowej posiadają znacznie więcej czujników, które charakteryzują się lepszymi parametrami. Praktycznie zawsze spotkamy się tutaj z pomiarami: prędkości i kierunku wiatru, natężeniem promieniowania słonecznego, czy punktu rosy. Zazwyczaj pomiary zewnętrzne i wewnętrzne wykonywane są osobnymi urządzeniami: wynika to m.in. z braku potrzeby pomiaru prędkości wiatru i nasłonecznienia wewnątrz budynku. Ponadto często wewnętrzna część stacji posiada interfejs użytkownika, który informuje o pomiarach z zewnątrz. Stacje z tego przedziału cenowego udostępniają różne usługi pogodowe oraz posiadają dedykowane aplikacje na telefon i komputer [12].



Rysunek 2.4. Przykładowa stacja pogodowa firmy Ambient Weather [12].

Stacje profesjonalne w najwyższym przedziale cenowym zawierają wysokiej klasy czujniki i rozwiązania techniczne, które pozwalają na bardzo dokładny pomiar składników pogody. Przystosowane są do długotrwałego działania w trudnych warunkach atmosferycznych, mają wysoką niezawodność. Na ogół mają mniej funkcji niż stacje ze średniej półki cenowej, gdyż są wyspecjalizowanymi urządzeniami do badania pogody danego obszaru. Zazwyczaj są to urządzenia atestowane, co po części tłumaczy ich wysoką cenę. Przeznaczone są m.in. dla placówek badawczych, rolników, służb ratowniczych i placówek dydaktycznych [13].

Obraz zawierający niebo, zewnętrzne, dzień

Opis wygenerowany automatycznie

Rysunek 2.5. Przykładowa stacja pogodowa firmy Davis [14].

# Warstwa sprzętowa

Dobór czujników należało przeprowadzić kierując się: klimatem regionu geograficznego, w którym stacja będzie pracować, zakresem i dokładnością urządzeń pomiarowych oraz dostępnością i ceną tychże komponentów na rynku.

## Czujnik temperatury i wilgotności

Wybrano urządzenie AM2320 firmy ASAIR. Specyfikacja techniczna sensora została ujęta w poniższych tabelach:

Tabela 3.1. Podstawowe parametry czujnika dla pomiaru wilgotności [15].

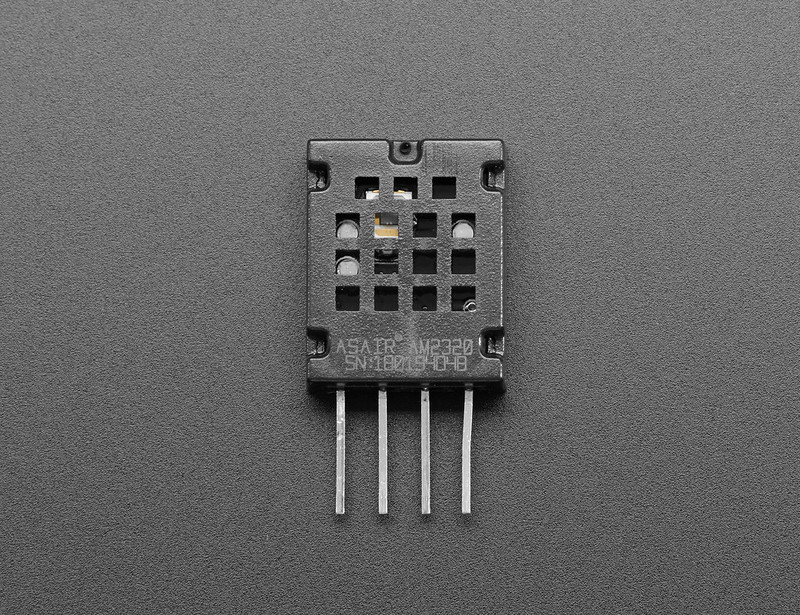
|  |  |
| --- | --- |
| Parametr | Wartość |
| Rozdzielczość | 0.1 % RH |
| Zakres pomiarów | 0 – 99.9 % RH |
| Dokładność | ±3 % RH |
| Powtarzalność | ±0.1 % RH |

Tabela 3.2. Podstawowe parametry czujnika dla pomiaru temperatury [15].

|  |  |
| --- | --- |
| Parametr | Wartość |
| Rozdzielczość | 16 bitów (0.1 ℃) |
| Zakres pomiarów | -40 – 80 ℃ |
| Dokładność | ±0.5 ℃ |
| Powtarzalność | ±0.2 ℃ |

Sensor korzysta z magistrali komunikacyjnej I2C, która wymaga podłączenia rezystorów podciągających na liniach zegara i danych. Nota katalogowa podaje zakresy rezystancji dla wyżej wspomnianych oporników jako przedział 3 – 10 kΩ. Zastosowano rezystory o wartości 4.7 kΩ. Czujnik zasilany jest napięciem stałym z zakresu 3.1 – 5.5 V. Wybrano wartość napięcia zasilania 3.3 V. Urządzenie posiada obudowę THT oraz cztery wyprowadzenia: zasilanie (VDD), masa (GND), linia danych (SDA), linia zegarowa (SCK) [15].

Zdecydowano się na ten czujnik głównie z powodu jego niskiej ceny oraz wystarczających parametrów do pomiaru składników pogody w strefie umiarkowanej. Atutem jest również możliwość komunikowania się za pomocą popularnej magistrali I2C. Wadą produktu jest kiepsko przetłumaczona z języka chińskiego na język angielski nota katalogowa, co bardzo utrudnia zdobycie informacji odnośnie jego użytkowania.



Rysunek 3.1. Zdjęcie czujnika AM2320 [16].

## Czujnik temperatury i ciśnienia

Wybrano urządzenie BMP280 producenta Bosch Sensortec. Sam czujnik został zamontowany na płytce HW-611 E/P, gdzie umieszczono wymagane pasywne elementy elektroniczne m.in. rezystory podciągające potrzebne do komunikacji po interfejsie I2C. Układ posiada rozbudowaną konfigurację, dlatego specyfikacja techniczna zostanie podana dla wybranego trybu użytkowania „Weather monitoring (lowest power)”.

Tabela 3.3. Podstawowe parametry czujnika dla pomiaru ciśnienia [17].

|  |  |
| --- | --- |
| Parametr | Wartość |
| Rozdzielczość | 16 bitów (2.62 Pa) |
| Zakres pomiarów | 300 – 1100 hPa |
| Dokładność | ±1.7 hPa dla temperatur -20 – 0 ℃ ±1.0 hPa dla temperatur 0 – 65 ℃ |
| Powtarzalność | ±1.0 hPa (okres 12 miesięcy) |

Tabela 3.4. Podstawowe parametry czujnika dla pomiaru temperatury [17].

|  |  |
| --- | --- |
| Parametr | Wartość |
| Rozdzielczość | 16 bitów (0.005 ℃) |
| Zakres pomiarów | -40 – 85 ℃ |
| Dokładność | ±0.5 ℃ dla temperatury 25 ℃ ±1.0 ℃ dla temperatur 0 – 65 ℃ |
| Powtarzalność | Nie podano |

Komunikacja z czujnikiem odbywa się za pomocą pisania do i odczytywania rejestrów. Sensor obsługuje interfejsy I2C oraz SPI. Ich wybór następuje automatycznie w zależności od stanu pinu CSB. Podpięcie do zasilania powoduje użycie I2C, natomiast podpięcie go do masy powoduje użycie SPI. Wybrano pierwszy z wymienionych interfejsów. Pomimo występowania rezystorów podciągających na liniach magistrali I2C komunikacja nie przebiegała prawidłowo. Zastosowanie dodatkowych oporników 4.7 kΩ rozwiązało problem. Czujnik zasilany jest napięciem stałym z przedziału 1.7 – 3.6 V. Wybrano napięcie zasilania 3.3 V. Urządzenie na gotowej płytce posiada 6 pinów: VCC, GND (zasilanie i masa), SDA, SCL (piny magistral I2C/SPI), CSB (wybór interfejsu komunikacyjnego), SDD (ustawia najmłodszy bit adresu w komunikacji I2C, lub jest pinem MISO w trybie SPI) [17].

Podobnie jak w przypadku czujnika wilgotności głównymi atutami BMP280 są cena i dostępność na rynku. Niewielkie rozmiary układu, montaż na płytce drukowanej wraz z niezbędnymi elementami pasywnymi są zaletami. Pod względem parametrów pomiarowych i ich konfiguracji układ prezentuje się bardzo dobrze. Wadą układu, nie samego sensora, jest konieczność dołączania rezystorów podciągających do linii sygnałowych magistrali I2C, gdyż mogłyby one znaleźć się na płytce.

Obraz zawierający sprzęt elektroniczny

Opis wygenerowany automatycznie

Rysunek 3.2. Zdjęcie płytki zawierającej czujnik BMP280 producenta Adafruit [18].

## Nadajnik - odbiornik radiowy

Wykorzystano moduł nRF24L01+ firmy Nordic Semiconductors zamontowany na płytce z niezbędnymi pasywnymi komponentami, oscylatorem kwarcowym oraz wbudowaną anteną. Operuje w paśmie ISM (ang. Industrial, Scientific, Medical), w zakresie częstotliwości 2.4 - 2.525 GHz. Komunikacja z modułem odbywa się poprzez pisanie do i odczytywanie rejestrów, a prowadzona jest interfejsem SPI. Wbudowana antena pozwala na wysyłanie danych w promieniu około 100 m, przy założeniu braku przeszkód fizycznych oraz niskiej prędkości przesyłu. Na rynku są również dostępne rozwiązania z wbudowanym złączem dla zewnętrznej anteny. Takie układy są w stanie osiągać do 1 km zasięgu na otwartej przestrzeni.

Transciever (ang. transmitter – receiver) posiada osiem pinów wyprowadzonych na płytkę: VCC, GND (zasilanie i masa), MISO, MOSI (dane wysyłane i odbierane z perspektywy układu peryferyjnego magistrali SPI), SCK (sygnał zegarowy SPI), CSN (wybór układu peryferyjnego SPI), CE (ang. chip enable, uruchamia tryb nadawania lub odbierania), IRQ (pin przerwań sprzętowych modułu). Na uwagę zasługuje ostatni z wymienionych pinów. Posiadanie sprzętowej sygnalizacji nadawania i odbierania pakietów umożliwia zmniejszenie zużycia zasobów procesora sterującego układem (nie trzeba ciągle odpytywać układu w oczekiwaniu na wiadomość, wystarczy poczekać na wystąpienie przerwania).

Moduł zasilany jest napięciem z zakresu 1.9 – 3.6 V. Wybrano napięcie zasilania 3.3 V. Pobór prądu w trybie oczekiwania wynosi około 22 µA, natomiast przy nadawaniu/odbieraniu szacuje się go na 12 mA. Może on ulec zmianie w zależności od ustawień wzmacniacza mocy nadajnika oraz niskoszumowego wzmacniacza odbioru odbiornika.

Głównym powodem wyboru tego modułu radiowego była niska cena, bardzo dobra dostępność na rynku oraz szerokie możliwości techniczne. Wykorzystanie łączności radiowej między punktami pomiarowymi nie wymaga, aby każdy z nich znajdował się pobliżu punktu WiFi ani łączenia ich przewodem. Dzięki technologii Enhanced ShockBurst [19] możliwe jest utworzenie jednego odbiornika, do którego transmituje do sześciu indywidualnych nadajników. Umożliwia to rozwój stacji pogodowej o dodatkowe punkty pomiarowe. Gdyby zastosować zewnętrzne anteny w układach to w najlepszym przypadku będzie można przeprowadzić pomiar składników pogody w sześciu różnych punktach w promieniu 1 km.

Obraz zawierający sprzęt elektroniczny, obwód

Opis wygenerowany automatycznie

Rysunek 3.3. Zdjęcie modułu radiowego nRF24l01 z wbudowaną anteną [20].

## Moduł Wifi

Użyto układu ESP-01S producenta AI-Thinker. Całość bazuje na SoC (ang. System-on-Chip) ESP8266EX firmy Espressif Systems. Sam system posiada 32-bitowy mikroprocesor, m.in. wbudowany stos protokołów TCP/IP, wsparcie dla magistral I2C, SPI oraz wyprowadzeń GPIO. Komunikacja z modułem może się na dwa sposoby. Pierwszym z nich jest wgrywanie programów do zewnętrznej pamięci Flash przy pomocy protokołu SPI. Drugim, który ogranicza się do funkcjonalności Wifi, jest skorzystanie ze standardu Hayes (komendy AT), które wysyła się za pomocą UART [21].

Układ pracuje w zakresie napięć 3.0 – 3.6 V. Wybrano napięcie zasilania 3.3 V. Pobór prądu w przypadku nadawania waha się w granicach od 120 mA do 170 mA. Uzależnione jest to m.in. użytego protokołu standardu 802.11 oraz wzmocnienia sygnału. Dla obierania danych pobór prądu wynosi ok. 56 mA. Moduł pracuje w paśmie ISM, w zakresie 2.4 – 2.4835 GHz [21].

Na płytkę drukowaną zostało wyprowadzone osiem pinów: VCC, GND (zasilanie i masa), RXD, TXD (piny odbioru i nadawania UART), GPIO0, GPIO2 (piny ogólnego przeznaczenia z wbudowanym rezystorem podciągającym), RST (reset układu), CH\_PD (pin aktywacji układu, aktywny stanem wysokim) [21].

Moduł został wybrany, gdyż nie udało się uruchomić stosu TCP/IP na mikrokontrolerze STM32, jak miało to miejsce w pierwotnych założeniach projektu. Ponadto układ ten jest dość tani i powszechnie dostępny. Inną zaletą jest bezprzewodowość tego rozwiązania. W przypadku pierwotnego zamysłu mikrokontroler STM musiałby być podłączony do routera kablem sieciowym RJ-45, co ograniczałoby położenie stacji pogodowej.

Obraz zawierający tekst, sprzęt elektroniczny, obwód

Opis wygenerowany automatycznie

Rysunek 3.4. Zdjęcie układu ESP-01S [22].

## Mikrokontrolery

Zdecydowano się na układy firmy STMicroelectronics z procesorami ARM. Wybór głównie podyktowany był znajomością i posiadaniem przez autora tego sprzętu. W projekcie wykorzystano dwie płytki: NUCLEO-F401RE oraz BlackPill.

### NUCLEO-F401RE

Płytka deweloperska produkowana przez STMicroelectronics. Posiada procesor STM32F401RE z rdzeniem ARM 32-bit Cortex -M4 CPU. Została wyposażona w m.in. FPU (ang. floating point unit), MPU (ang. memory protection unit) oraz DMA (ang. direct memory access) [23].

Procesor wspiera zarówno protokoły JTAG (ang. joint test action group) oraz SWD (serial wire debug). Na płytce zamontowany jest programator/debugger ST-LINK połączony z portem USB, co umożliwia łatwe programowanie i debugowanie. Piny programatora zostały wyprowadzone na płytkę, pozwalając na programowanie innych mikrokontrolerów typu ARM. MCU (ang. microcontroller unit) posiada 512 KB pamięci Flash oraz 96 KB statycznej pamięci RAM. Z układów/peryferii można wymienić:

* Do 11 timerów o różnej wielkości i częstotliwości do 84 MHz.
* Do 81 portów wejścia/wyjścia z tolerancją 5 V oraz możliwością generowania przerwań.
* Do 12 różnych interfejsów i magistral komunikacyjnych (I2C, SPI, USART, LIN itp.) [23].

W projekcie wykorzystano dwie magistrale I2C, jedną magistralę SPI, dwa interfejsy USART, trzy timery oraz DMA.

Procesor zasilany jest napięciem z zakresu 1.7 – 3.6 V. Wybrano napięcie zasilania   
3.3 V dostarczane poprzez port USB. Pobór prądu uzależniony jest od ilości układów peryferyjnych i obciążenia MCU. Na płytkę zostały wyprowadzone połączenia: ST Morpho (męskie piny) z dostępem do wszystkich pinów I/O procesora oraz ARDUINO Uno V3 (żeńskie piny) do użycia z tzw. shieldami [23].

Pierwotnie zakładano użycie płytki deweloperskiej NUCLEO-F429ZI, który umożliwia uruchomienie stosu TCP/IP oraz posiada złącze Ethernet, jednakże brak sukcesów w realizacji tego zadania spowodował porzucenie tego pomysłu. Powodem wyboru NUCLEO-F401RE w stosunku do F429ZI był jej mniejszy fizyczny rozmiar.

Obraz zawierający tekst, obwód, sprzęt elektroniczny

Opis wygenerowany automatycznie

Rysunek 3.5. Zdjęcie przykładowej płytki STM32 NUCLEO [24].

### BlackPill

Płytka nieznanego producenta z Chin, zawierająca procesor STM32F401CCU6 z rdzeniem ARM 32-bit Cortex -M4 CPU. MCU jest niemalże identyczne z wyżej opisanym STM32F401RE pod względem zasobów i układów peryferyjnych. Widoczne różnice są w ilości pamięci. Procesor z płytki BlackPill posiada mniej pamięci Flash i SRAM, natomiast zaopatrzony został w 512 KB pamięci programowalnej jednokrotnie [25].

Sama płytka posiada złącze USB-C, dwa rzędy wyprowadzeń pinów z procesora, złącze programatora SWD, przycisk oraz diodę użytkownika, przyciski RESET i BOOT, diodę sygnalizującą zasilanie. Posiada również osobne miejsce na dołączenie pamięci Flash komunikującej się przez SPI [26].

Wykorzystano następujące peryferia procesora: dwie magistrale I2C, jedna magistrala SPI, jeden timer.

Zdecydowano się na ten układ z powodu jego niewielkich rozmiarów oraz wystarczającego MCU do obsługi dwóch czujników i modułu radiowego. Minusem tej płytki jest brak programatora ST-Link.

Obraz zawierający tekst, sprzęt elektroniczny, obwód

Opis wygenerowany automatycznie

Rysunek 3.6. Płytka BlackPill (opracowanie własne).

## Zasilanie

Wszystkie czujniki, moduły komunikacji bezprzewodowej oraz płytki z mikroprocesorami działają na napięciu 3.3 V. Zdecydowano się na dwa różne podejścia do kwestii zasilania w zależności od potrzeb konkretnej części stacji pogodowej.

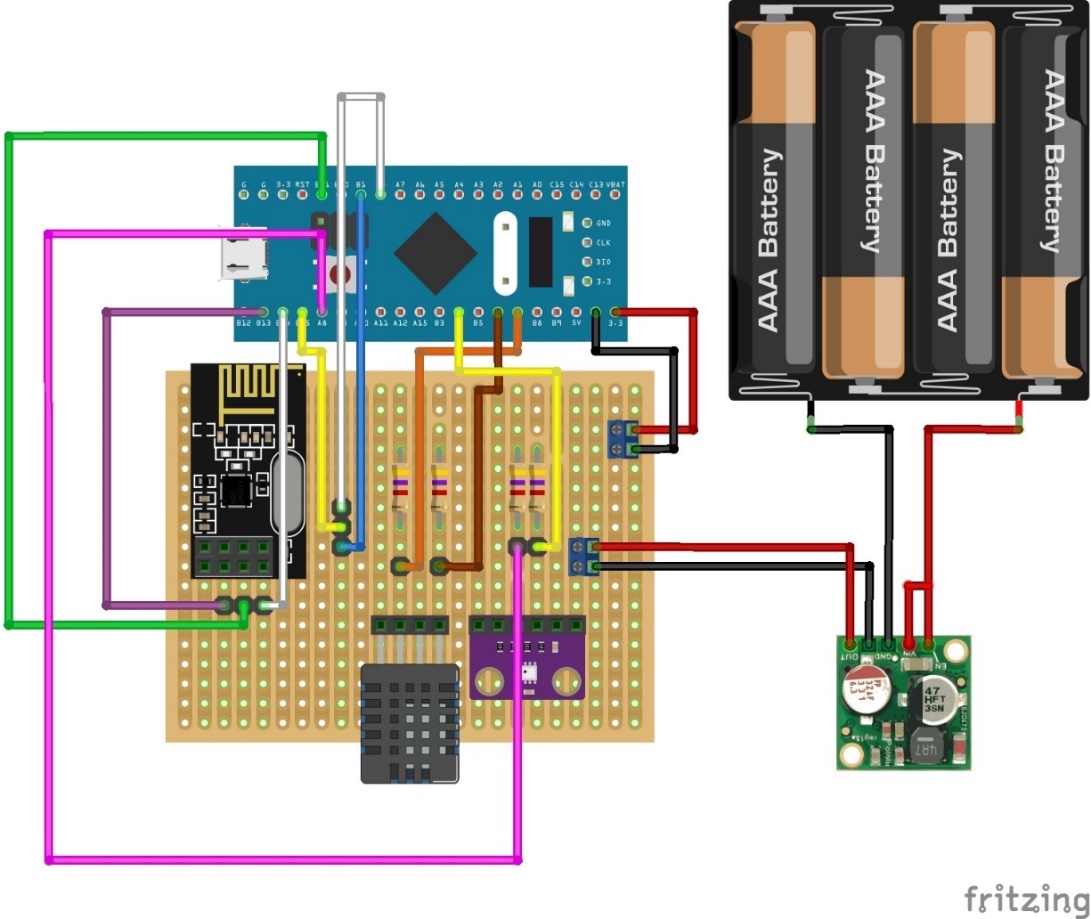
Dla mobilnego punktu pomiarowego wymagane było użycie ogniw bądź akumulatorów. Zdecydowano się na akumulatory EZA106 firmy Esperanza. Są to ogniwa niklowo-metalowo-wodorkowe rozmiaru AA. Charakteryzują się wysoką gęstością energii, długo utrzymują napięcie znamionowe oraz mogą być ponownie ładowane. Producent deklaruje pojemność 2600 mAh oraz napięcie 1.2 V [27]. Wydajność prądowa nie została podana. Wykorzystano cztery ogniwa połączone szeregowo, aby zwiększyć napięcie zasilania.

Napięcie z baterii podawane jest do przetwornicy typu step up – step down. Jest to układ nieznanego producenta. Zakres napięcia wejściowego to 3 – 15 V DC. Napięcie wyjściowe jest stałe na poziomie 3.3 V z dokładnością do 0.1 V. Maksymalny prąd wyjściowy to 600 mA. Maksymalna wydajność wynosi 85%. Nie podano szacowanej żywotności układu [28]. Zdecydowano się na ten układ głównie z powodu jego niskiej ceny oraz parametrów wystarczających do poprawnej pracy układu.

Dla stacjonarnego punktu pomiarowego zdecydowano się na zasilanie poprzez port USB. Wykorzystano w tym celu moduł zasilający do płytek stykowych MB102. Urządzenie posiada wtyk DC 2,1 x 5,5 mm oraz gniazdo USB typu A. Możliwe do uzyskania są dwa poziomy zasilania: 5 V i 3.3 V. Maksymalny prąd wyjściowy to 700 mA [29]. Układ dostarcza zasilanie do dwóch szyn płytki stykowej: z jednej zasilane są czujniki i moduły komunikacji bezprzewodowej, zaś z drugiej płytka Nucleo. Zdecydowano się na to rozwiązanie z powodu posiadania przez autora opisanego modułu zasilającego.

## Schematy połączeń i wykonanie fizyczne

Poglądowe schematy połączeń wykonano przy pomocy oprogramowania Fritzing. Schematy są ideowe, różnią się od rzeczywistego wykonania.

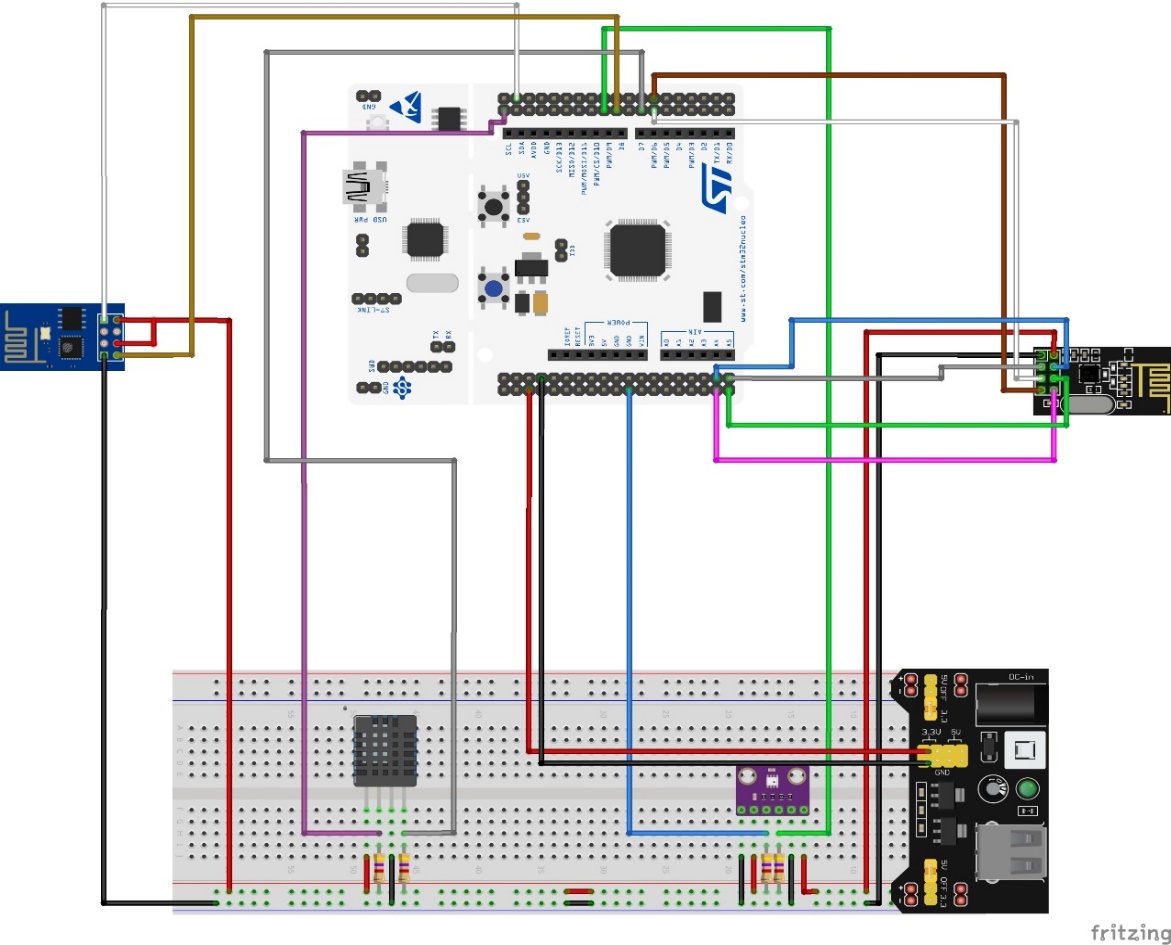


Rysunek 3.7. Schemat połączenia czujników oraz zasilania mobilnego punktu pomiarowego.

Obraz zawierający tekst, obwód, sprzęt elektroniczny

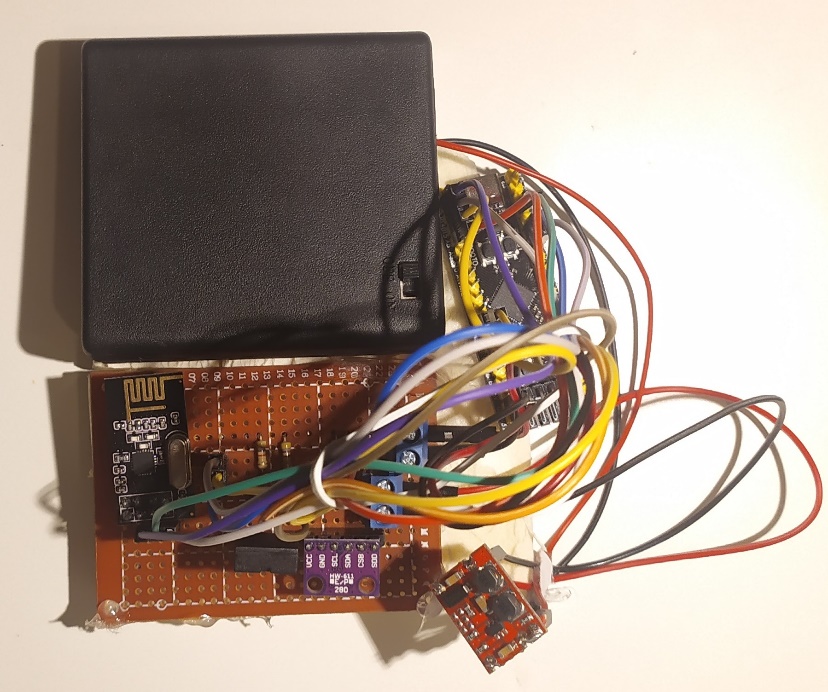
Opis wygenerowany automatycznie

Rysunek 3.8. Schemat połączeń lutowanych na płytce prototypowej (spód płytki).

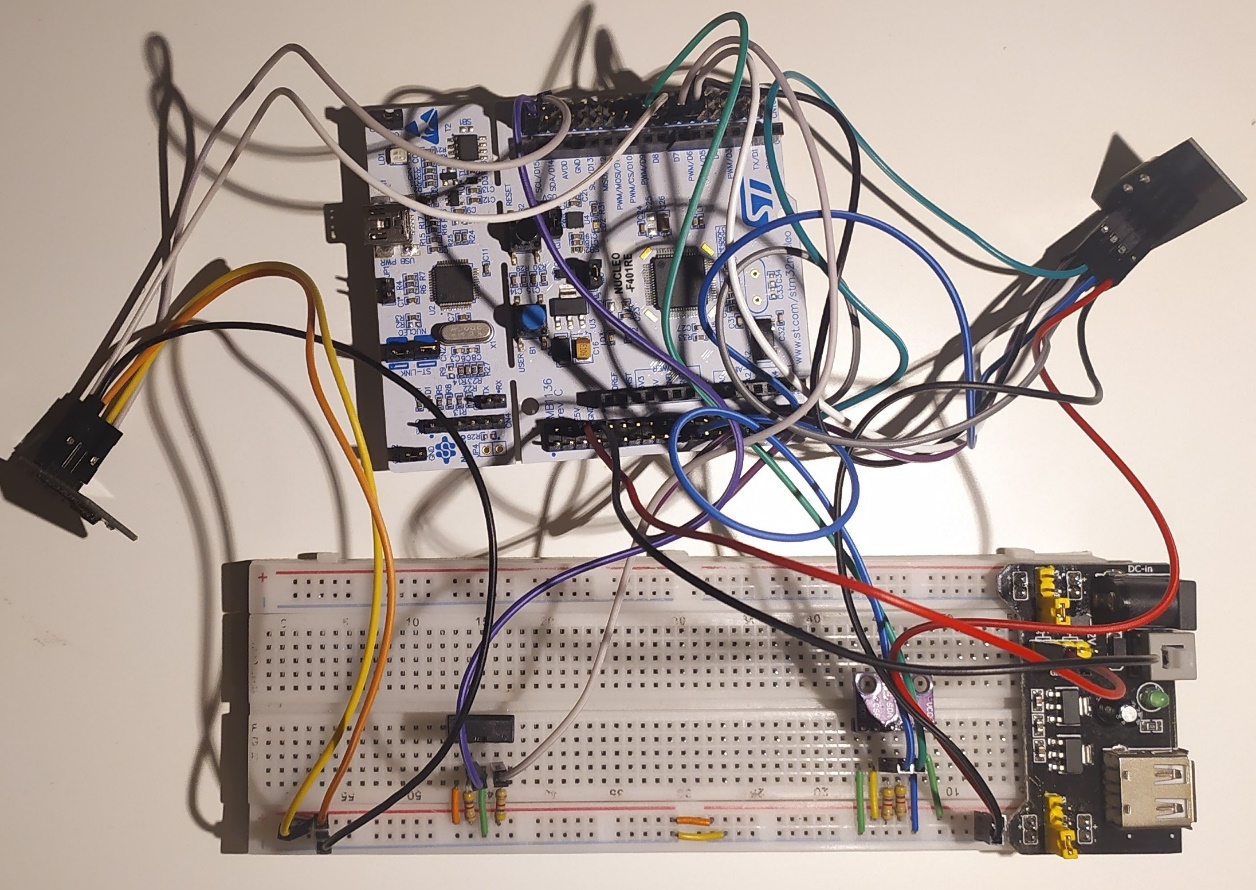


Rysunek 3.9. Schemat połączeń dla stacjonarnego punktu pomiarowego.

Fizyczna realizacja mobilnego punktu pomiarowego różni się od schematu tym, że całość zamontowano na płycie wykonanej z polistyrenu ekstrudowanego. Ma to na celu ułatwienie przenoszenia tej części stacji pogodowej. W przypadku stacjonarnego punktu pomiarowego schemat wygląda podobnie do rzeczywistego obiektu.



Rysunek 3.10. Fizyczna realizacja mobilnego punktu pomiarowego.



Rysunek 3.11. Fizyczna realizacja stacjonarnego punktu pomiarowego.

# Oprogramowanie

Biblioteki czujników AM2320, BMP280, modułu radiowego nRF24L01+ oraz modułu WiFi zostały napisane własnoręcznie w oparciu o przykłady udostępnione na zasadzie wolnych licencji [30]–[33]. Inspirowano się głównie strukturą kodu. Algorytmy i funkcje zostały zbadane pod kątem zgodności z dokumentacją danego układu. Aplikacja napisana została w trybie bare-metal, czyli nie posiada systemu operacyjnego.

## Środowisko programistyczne

Skorzystano z oprogramowania STM32CubeIDE w wersji 1.10.1 firmy STMicroelectronics. Jest to platforma deweloperska umożliwiająca generację kodu, konfigurację peryferii, kompilację oraz debuggowanie kodu dla mikrokontrolerów i mikroprocesorów STM32. Kod można tworzyć w dwóch językach: C oraz C++. CubeIDE oparte jest na platformie programistycznej Eclipse, zestawie kompilatorów GCC (ang. GNU Compiler Collection) i debuggerze GDB (ang. GNU Debugger) [34].

Użyto narzędzia do generacji kodu STM32CubeMX, które jest w pakiecie z CubeIDE. Z jego pomocą użytkownik jest w stanie wygenerować większość niezbędnego kodu do obsługi MCU i jego peryferii. Wykorzystano również bibliotekę HAL wchodzącą w skład wyżej wspomnianego oprogramowania. Stanowi ona wysokopoziomowy interfejs do obsługi układów peryferyjnych.

Powodem użycia powyższego oprogramowania była znajomość tego środowiska przez autora oraz posiadanie procesorów firmy STMicroelectronics. Ponadto ten zestaw narzędzi ułatwia konfiguracje i programowanie wyżej wspomnianych MCU.

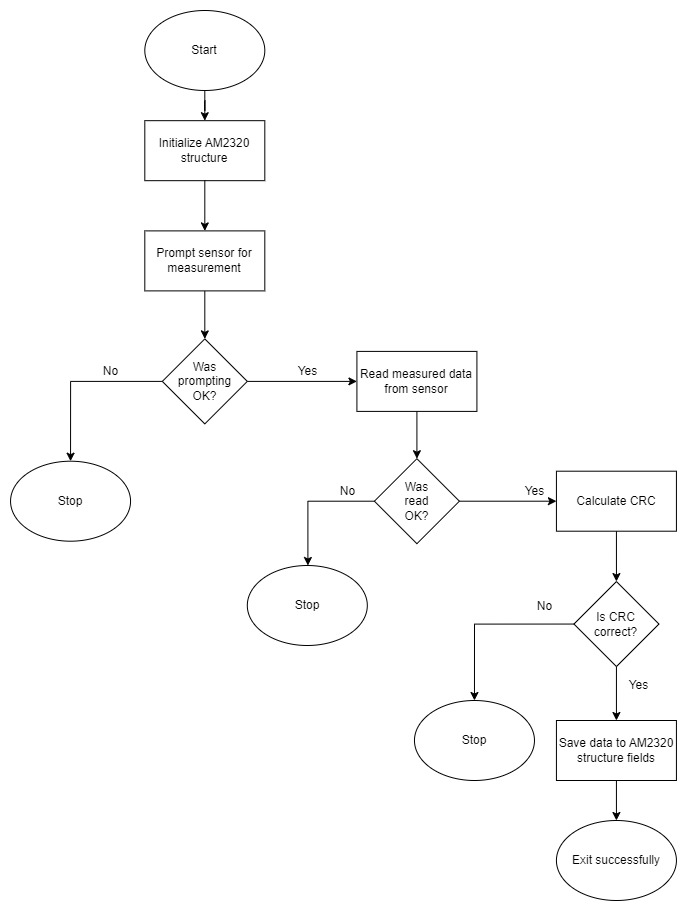
## Biblioteka czujnika wilgotności i temperatury

Napisana została w oparciu o dokumentację [15] oraz gotową bibliotekę użytą jako referencja [30]. Składa się z jednego pliku nagłówka i jednego pliku źródłowego. Jak zostało opisane w sekcji sprzętowej czujnik komunikuje się za pomocą magistrali I2C. Na obydwu MCU jest ona wspierana sprzętowo. Jej konfiguracja została przeprowadzona z poziomu aplikacji CubeMX.

Utworzona została globalna struktura, w której przechowywane są: uchwyt do magistrali I2C, adres czujnika przesunięty bitowo w lewo o jeden oraz dwie zmienne zawierające ostatni poprawny pomiar temperatury i wilgotności. Przesunięcie bitowe wynika z przechowywania adresu czujnika w bitach 7 do 1 rejestru CR2 powyższej magistrali. Dostępne funkcje wpisują adres bezpośrednio, zatem trzeba wykonać przesunięcie, aby adres trafił w odpowiednie miejsce.

Skorzystano z konceptu kodów błędów. Funkcja odpowiedzialna za pomiar i odczyt danych zwraca 1 w przypadku poprawnego wykonania lub 0 w przypadku błędu. Zastosowanie takiego podejścia ułatwiło debuggowanie kodu oraz umożliwiło obsługę sytuacji, w której nie mamy poprawnego pomiaru.

Funkcja obliczająca kod CRC została bezpośrednio zaczerpnięta z dokumentacji czujnika.



Rysunek 4.1. Schemat blokowy przedstawiający działanie czujnika AM2320.

## Biblioteka czujnika ciśnienia i temperatury

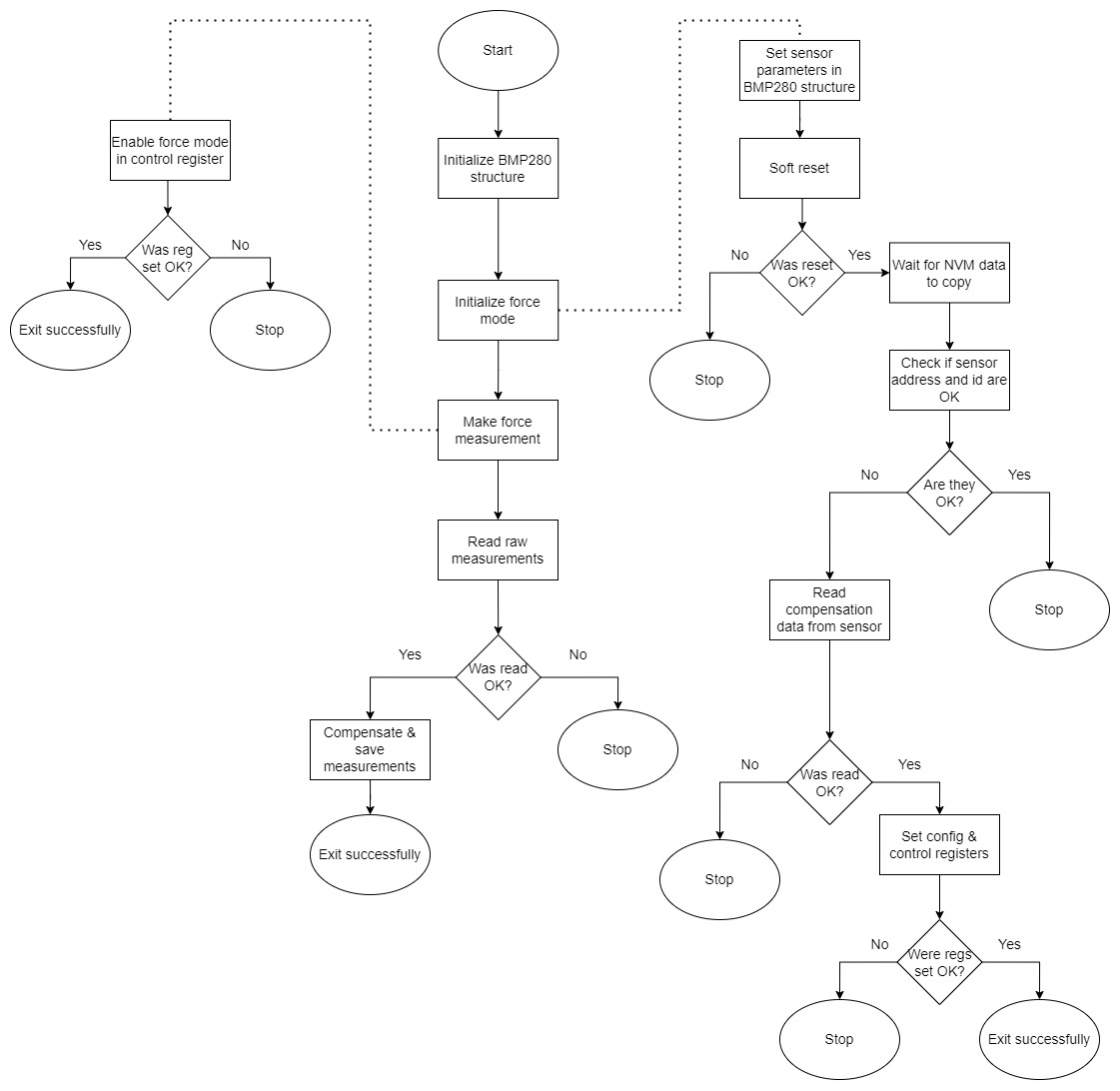
Biblioteka została napisana w oparciu o dokumentację [17] oraz publicznie dostępną bibliotekę wykorzystaną jako referencja [31]. Czujnik BMP280, podobnie jak AM2320, komunikuje się za pomocą magistrali I2C. Choć protokół ten wspiera wiele urządzeń na jednej magistrali to zdecydowano się skorzystać z osobnych magistral dla obu czujników. Było to możliwe ze względu na odpowiednie zasoby sprzętowe MCU. Takie rozwiązanie umożliwia potencjalny równoległy pomiar i odczyt danych z sensorów. Nie trzeba również współdzielić jednego zasobu sprzętowego co zmniejsza ilość potencjalnych błędów oprogramowania. Biblioteka składa się z jednego pliku nagłówkowego i jednego pliku źródłowego.

Komunikacja z BMP280 oparta jest na zapisie i odczycie rejestrów. W tym celu utworzono najbardziej podstawową funkcję, którą jest zapis i odczyt 8 bitowego rejestru. Opiera się na niej większość funkcji wyższego poziomu (takich jak wykonanie pomiaru lub inicjalizacja czujnika).

Utworzona została globalna struktura przechowująca ustawienia czujnika podane przez użytkownika oraz uchwyt magistrali I2C. Podejście takie pozwala przekazywać jedną strukturę jako argument większości funkcji, co upraszcza korzystanie ze stworzonego interfejsu. Ponadto przechowywanie parametrów podanych przez użytkownika w jednym miejscu i odwoływanie się w programie do nich tylko i wyłącznie za pomocą pól struktury zmniejsza ryzyko błędu przy wielokrotnym przekazywaniu tego samego parametru.

Podobnie jak w przypadku czujnika AM2320 również tutaj adres urządzenia musiał być przesunięty bitowo w lewo o jeden, co jak już wspomniano wynika bezpośrednio z implementacji biblioteki HAL.

Poniżej zaprezentowano schemat blokowy opisujący wysokopoziomowo pracę czujnika. Przerywane linie wychodzące z niektórych bloków przedstawiają działanie tego bloku.



Rysunek 4.2. Schemat blokowy przedstawiający działanie czujnika BMP280.

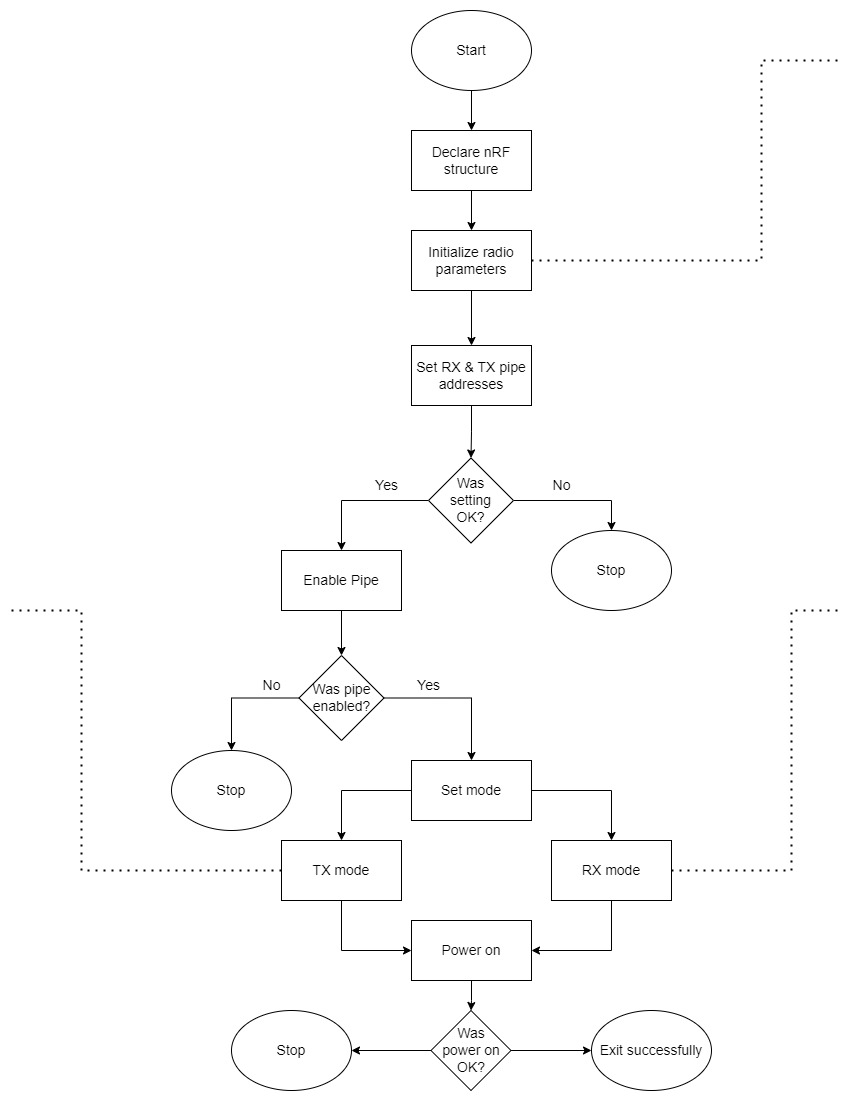
## Biblioteka nadajnika i odbiornika radiowego

Biblioteka została napisana w oparciu o dokumentację [19] oraz publicznie dostępną bibliotekę wykorzystaną jako referencja [32]. Komunikację z modułem przeprowadzono po magistrali SPI. Podobnie jak w przypadku czujnika BMP280 odbywa się ona poprzez zapis i odczyt rejestrów. Działanie magistrali SPI powoduje, że przesył informacji z urządzenia nadrzędnego do podrzędnego powoduje także komunikację w drugą stronę. Zdecydowano się rozdzielić funkcjonalności zapisu i odczytu tak, aby zapis nie zwracał żadnych danych (dane przychodzące po magistrali są odrzucane).

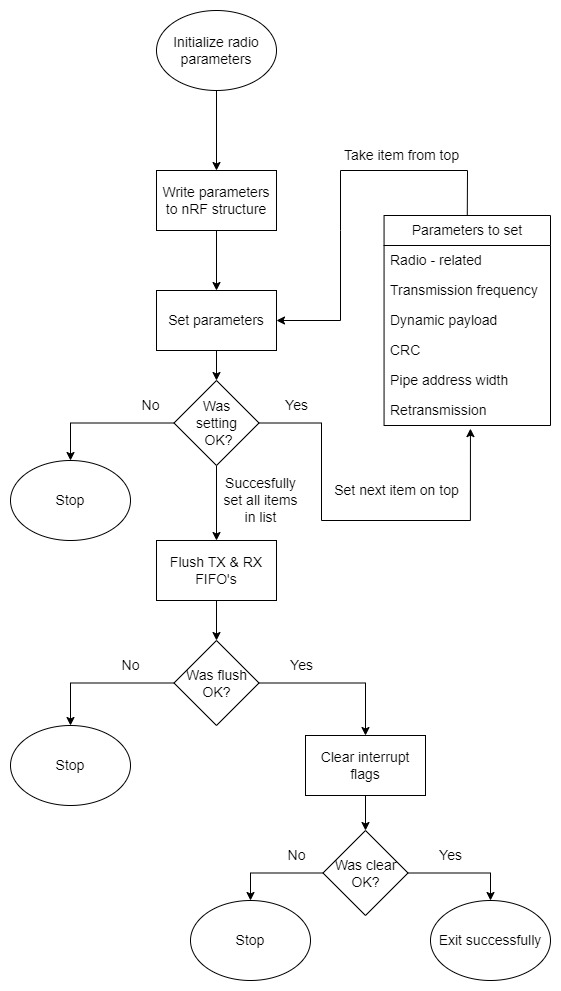
Biblioteka składa się z dwóch plików nagłówkowych oraz jednego pliku źródłowego. Zdecydowano się utworzyć dwa pliki nagłówka ze względu na dużą ilość definicji adresów pamięci, masek bitowych, enumeracji i komend SPI. Wszystkie opisane znajdują się w pliku nrf\_defines.h. Plik nrf.h zawiera deklarację funkcji.

Kod umożliwia konfigurację modułu zarówno jako nadajnik i odbiornik. Było to możliwe dzięki odpowiednio zrealizowanej architekturze urządzenia. Różnica w inicjalizacji jest niewielka. Dla nadawania należy ustawić najmłodszy bit rejestru CONFIG na 0, dla odbierania na 1. Ponadto, aby uruchomić nasłuchiwanie odbiornika pin CE musi się znaleźć w stanie wysokim. Różnice konfiguracyjne pojawiają się również w przypadku korzystania z niektórych funkcjonalności warstwy łącza danych Enhanced Shockburst.

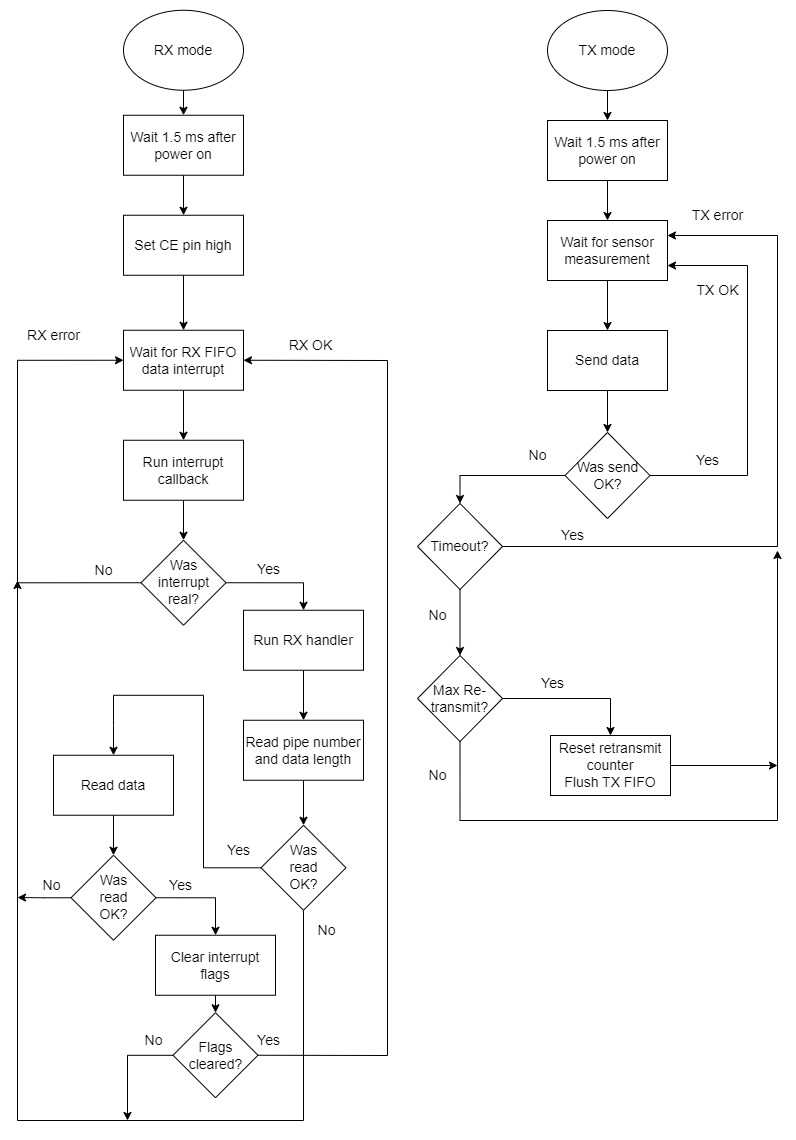
Podobnie jak w przypadku czujnika BMP280 przerywane linie z poniższego schematu blokowego przedstawiają wewnętrzny schemat danego bloku (przedstawiono na osobnych schematach).



Rysunek 4.3. Schemat blokowy pracy modułu radiowego nRF24l01+.



Rysunek 4.4. Schemat blokowy inicjalizacji modułu radiowego.



Rysunek 4.5. Schemat blokowy działania odbiornika i nadajnika.

Warto rozwinąć temat generacji przerwań sprzętowych przez wyżej opisany układ. Zarówno nadajnik i odbiornik mają możliwość generacji trzech różnych przerwań: dane w kolejce RX, dane wysłane z potwierdzeniem odbioru, przekroczono maksymalną ilość retransmisji. Wykorzystano tylko przerwanie dla odbiornika „dane w kolejce RX”. W ten sposób nie trzeba okresowo odczytywać wartości rejestru i sprawdzać stanu kolejki.

## Biblioteka modułu Wifi

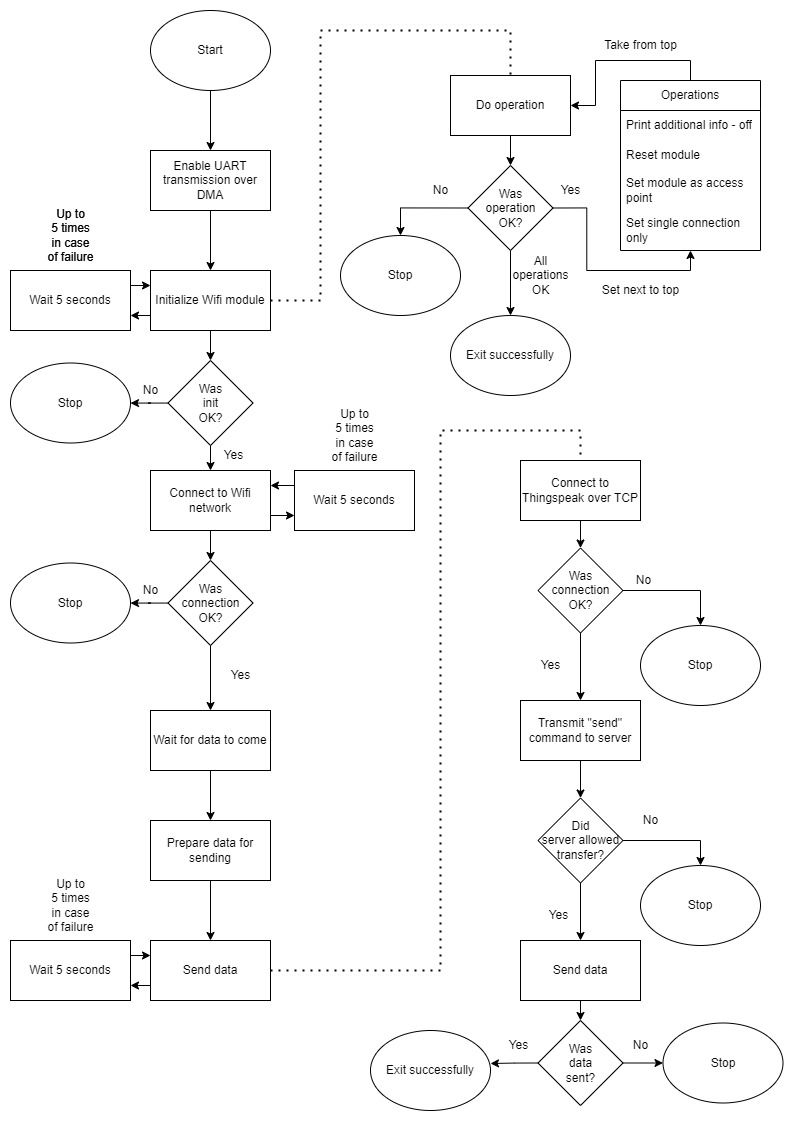
Biblioteka składa się z jednego pliku źródłowego i nagłówkowego. Jest autorska, natomiast korzysta z gotowej biblioteki do obsługi UART przy pomocy DMA [33].

Komunikacja z modułem odbywa się przez komendy AT [35]. Wysyłane są za pomocą UART w postaci łańcuchów znaków. Zazwyczaj komunikacja przebiega w następujący sposób: wysyłane zostaje polecenie, moduł potwierdza wykonanie polecenia lub jego niepowodzenie. W zależności od ustawień układ może zwracać dodatkowe komunikaty. W opisywanej bibliotece zostały one wyłączone.

Wykorzystanie DMA do obsługi UART powodowane było brakiem determinizmu długości odpowiedzi modułu oraz czasu, w którym zostanie ona dostarczona. Zastosowano przerwanie UART IDLE. Monitoruje ono linię RX oczekując na dane. Gdy w trakcie odbierania danych pojawia się przerwa w transmisji o długości jednego znaku to następuje przerwanie. Następnie w obsłudze przerwania IDLE zatrzymane zostaje DMA, co prowadzi do generacji kolejnego przerwania, tym razem od zakończenia transmisji DMA. W ten sposób można odbierać wiadomości różnej długości nie obciążając zbytnio procesora. Zapis odebranych danych odbywa się przy pomocy bufora kołowego.

Z powodu braku określonego czasu odpowiedzi układu oddelegowano osobny timer do wyznaczania limitu czasu komunikacji. Jest on uruchamiany po wysłaniu każdego polecenia, następnie oczekuje określony czas, zeruje licznik i zostaje wyłączony. Dopiero wtedy wyszukiwana jest odpowiedź w buforze kołowym.

Każda główna operacja (inicjalizacja modułu, połączenie się z siecią Wifi oraz wysłanie danych do serwera) może zostać powtórzona do pięciu razy. Przyjęto takie założenie, aby zminimalizować potencjalne straty pakietów przez kiepską jakość sieci.



Rysunek 4.6. Schemat blokowy działania modułu ESP-01S.

## Główny program

Aplikacje dla każdego z procesorów zostały oparte na projekcie szablonowym wygenerowanym przez STMCubeMX. Opisane powyżej biblioteki dołączone do projektu poprzez pliki nagłówkowe.

Dla mobilnego punktu pomiarowego (nadajnika) kod różni się w stosunku do punktu stacjonarnego (odbiornika). Różnice dotyczą głównie komunikacji bezprzewodowej. Początek działania obu aplikacji jest podobny. Sprowadza się do deklaracji i definicji wymaganych struktur, dołączenia niezbędnych bibliotek, inicjalizacji HAL oraz użytych peryferii.

W mobilnym punkcie pomiarowym kolejnym krokiem po wykonaniu wyżej opisanych zadań jest uruchomienie zegara wraz z obsługą przerwania od zakończenia odliczania. Następnie inicjalizowane są czujniki oraz moduł radiowy. Po udanej inicjalizacji program przechodzi do nieskończonej pętli. Większość czasu w pętli nie są wykonywane żadne instrukcje. Odliczenie przez zegar ustalonego czasu powoduje rozpoczęcie pomiaru. Dzieje się to pośrednio przez globalną flagę ustawianą w przerwaniu na wartość 1, a sprawdzaną cały czas w pętli.

Pierwsze mierzone są wilgotność i temperatura przez czujnik AM2320, następnie ciśnienie i temperatura przez czujnik BMP280. Od razu po zakończeniu pomiaru zmierzone wielkości zapisane są do 12 bajtowej tablicy. Gdy pomiar którejś z wielkości nie powiódł się wpisywane w ich miejsce są kody błędu. Dla temperatury i wilgotności wynoszą one 255, zaś dla ciśnienia 0. Po zapisaniu danych są one wysyłane przez nadajnik radiowy. Flaga gotowości pomiaru jest zerowana. Program powraca do oczekiwania na przerwanie od zegara.

Kod stacjonarnego punktu jest bardziej skomplikowany z powodu konieczności komunikacji z serwerem Thingspeak. Na etapie inicjalizacji występuje dodatkowo konfiguracja modułu Wifi oraz jego połączenie się z siecią lokalną. Pomiar, analogicznie jak w mobilnym punkcie, oparty jest o przerwanie zegara i globalną flagę. Komunikacja radiowa zrealizowana jest inaczej. W pętli sprawdzana jest flaga, która ustawiana jest na 1 tylko w przerwaniu od transmisji przychodzącej. Ustawienie flagi powoduje uruchomienie funkcji przyjmującej dane i zapisującej je lokalnie.

Ostatnim etapem jest wysłanie danych na serwer. Następuje ono zarówno po wykonaniu pomiaru lokalnie, jak i po odebraniu danych z punktu mobilnego. Przed wysłaniem następuje uśrednianie pomiarów temperatury. Kolejnym krokiem jest zapisanie danych w postaci zmiennoprzecinkowej. Dla temperatury i ciśnienia przyjęto dokładność do 2 miejsc po przecinku. Dla wilgotności jest to jedno miejsce po przecinku. Zdecydowano się wysyłać dane w dwóch osobnych transmisjach. Zaletą tego rozwiązania jest niezależność punktów pomiarowych. Wadą jest ograniczenie serwera, który przyjmuje dane nie częściej niż co 15 sekund. Aby zapobiec utracie danych przez zbyt wczesne transmisje wykorzystano kolejny timer. Uruchamiany jest, jeśli którakolwiek transmisja miała miejsce i odlicza do 16 sekund. Jednocześnie zainicjalizowana zostaje flaga, która zapobiega wcześniejszemu wysłaniu danych z drugiego źródła. Zrealizowane jest to przez wejście do nieskończonej pętli, gdy flaga jest równa 1. Flagę zeruje przerwanie od zakończenia odliczania. Wyłącza ono również zegar, aby nie generował niechcianych przerwań. Po wysłaniu program powraca do głównej pętli, oczekując na pomiar lub dane z mobilnego punktu.

# Analiza uzyskanych wyników

# Literatura

[1] *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. World Meteorological Organization Geneva, Switzerland, 2014. doi: 10.25607/OBP-1533.

[2] S. N. Swamy and S. R. Kota, ‘An empirical study on system level aspects of Internet of Things (IoT)’, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 188082–188134, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3029847.

[3] S. Nižetić, P. Šolić, D. López-de-Ipiña González-de-Artaza, and L. Patrono, ‘Internet of Things (IoT): Opportunities, issues and challenges towards a smart and sustainable future’, *J Clean Prod*, vol. 274, p. 122877, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.122877.

[4] S. Goldsmith, ‘As the Chorus of Dumb City Advocates Increases, How Do We Define the Truly Smart City? | Data-Smart City Solutions’, Sep. 16, 2021. Accessed: Nov. 17, 2022. [Online]. Available: https://datasmart.ash.harvard.edu/chorus-dumb-city-advocates-increases-how-do-we-define-truly-smart-city

[5] P. B. Leelavinodhan, M. Vecchio, F. Antonelli, A. Maestrini, and D. Brunelli, ‘Design and Implementation of an Energy-Efficient Weather Station for Wind Data Collection’, *Sensors 2021, Vol. 21, Page 3831*, vol. 21, no. 11, p. 3831, Jun. 2021, doi: 10.3390/S21113831.

[6] M. Kusriyanto and A. A. Putra, ‘Weather Station Design Using IoT Platform Based On Arduino Mega’, in *ISESD 2018 - International Symposium on Electronics and Smart Devices: Smart Devices for Big Data Analytic and Machine Learning*, Jan. 2019. doi: 10.1109/ISESD.2018.8605456.

[7] P. Kapoor and F. Ahmed Barbhuiya, *Cloud Based Weather Station using IoT Devices; Cloud Based Weather Station using IoT Devices*. 2019.

[8] ‘Arduino Docs | Arduino Documentation | Arduino Documentation’. https://docs.arduino.cc/ (accessed Nov. 19, 2022).

[9] ‘Raspberry Pi Documentation’. https://www.raspberrypi.com/documentation/ (accessed Nov. 19, 2022).

[10] D. K. Singh, H. Jerath, and P. Raja, *Low Cost IoT Enabled Weather Station; Low Cost IoT Enabled Weather Station*. 2020.

[11] ‘Ranking: najlepsze stacje pogodowe 2022🥇’. https://www.skapiec.pl/cat/4459-stacje-pogodowe/ranking.html (accessed Nov. 19, 2022).

[12] ‘Ambient Weather WS-2902 Smart Weather Station with WiFi Remote Monitoring and Alerts’. https://ambientweather.com/ws-2902-smart-weather-station (accessed Nov. 17, 2022).

[13] ‘Vantage Pro2 — Davis Instruments’. https://www.davisinstruments.com/pages/vantage-pro2 (accessed Nov. 19, 2022).

[14] ‘File:Vantage Vue weather station.jpg - Wikimedia Commons’. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vantage\_Vue\_weather\_station.jpg (accessed Nov. 19, 2022).

[15] ‘Digital Temperature and Humidity Sensor AM2320 Product Manual’.

[16] ‘AM2320 Digital Temperature and Humidity Sensor | Available a… | Flickr’. https://www.flickr.com/photos/adafruit/39982173704/ (accessed Dec. 06, 2022).

[17] ‘BMP280: Data sheet Document revision 1.12 Document release date’, 2014.

[18] ‘Adafruit BMP280 I2C or SPI Barometric Pressure & Altitude … | Flickr’. https://www.flickr.com/photos/adafruit/39843355072 (accessed Dec. 06, 2022).

[19] ‘nRF24L01  Single Chip 2.4GHz Transceiver Product Specification’.

[20] ‘File:NRF24l01 Nordic Semiconductor radio.JPG - Wikimedia Commons’. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NRF24l01\_Nordic\_Semiconductor\_radio.JPG (accessed Dec. 07, 2022).

[21] ‘ESP-01 WiFi Module’, 2015. [Online]. Available: http://www.ai-thinker.com

[22] ‘WiFi Module - ESP8266 | www.sparkfun.com/products/13678 | Flickr’. https://www.flickr.com/photos/sparkfun/19681470919 (accessed Dec. 07, 2022).

[23] ‘STM32F401xD STM32F401xE’. [Online]. Available: www.st.com

[24] ‘File:Embedded World 2016, STM Nucleo 401.jpg - Wikimedia Commons’. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Embedded\_World\_2016,\_STM\_Nucleo\_401.jpg (accessed Dec. 07, 2022).

[25] ‘STM32F401xB STM32F401xC’, 2019. [Online]. Available: www.st.com

[26] ‘MiniF4xx\_v2\_1.3-EN-2’, Accessed: Dec. 13, 2022. [Online]. Available: https://msalamon.pl/download/1327/

[27] ‘Akumulator Esperanza EZA106 R6 AA Ni-MH 2600mAh - 4szt. Sklep Botland’. https://botland.com.pl/akumulatory-ni-mh/6740-akumulator-esperanza-eza106-r6-aa-ni-mh-2600mah-4szt-5901299922552.html (accessed Dec. 13, 2022).

[28] ‘Moduł przetwornicy DC-DC Step-Up/Step-Down 3,3V 600mA - sklep Kamami’. https://kamami.pl/step-upstep-down/587679-modul-przetwornicy-dc-dc-step-upstep-down-33v-600ma.html (accessed Dec. 13, 2022).

[29] ‘Moduł zasilający do płytek stykowych MB102 - 3,3V 5V Sklep Botland’. https://botland.com.pl/moduly-zasilajace/1482-modul-zasilajacy-do-plytek-stykowych-mb102-33v-5v-5904422300739.html (accessed Dec. 13, 2022).

[30] ‘SimpleMethod/STM32-AM2320: STM32 library for temperature and humidity sensor AM2320 using HAL and I2C’. https://github.com/SimpleMethod/STM32-AM2320 (accessed Dec. 14, 2022).

[31] ‘ciastkolog/BMP280\_STM32: BMP280 / BME280 driver STM32 HAL I2C’. https://github.com/ciastkolog/BMP280\_STM32 (accessed Dec. 14, 2022).

[32] ‘elmot/nrf24l01-lib: Library for NRF24L01 + Demo projects for STM32 NUCLEO boards.’ https://github.com/elmot/nrf24l01-lib (accessed Dec. 14, 2022).

[33] ‘lamik/UART\_DMA\_receiving: STM32F411RE, STM32CubeIDE, HAL F4 1.24.1’. https://github.com/lamik/UART\_DMA\_receiving (accessed Dec. 14, 2022).

[34] ‘STM32CubeIDE - Integrated Development Environment for STM32 - STMicroelectronics’. https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html (accessed Dec. 14, 2022).

[35] ‘ESP8266 Non-OS AT Instruction Set’, 2021. [Online]. Available: www.espressif.com