

Waldemar JEŃSKO*, Piotr KUWAŁEK*

BEZPRZEWODOWA SIECIOWA KARTA POMIAROWA

W artykule przedstawiono prototyp bezprzewodowej sieciowej karty pomiarowej udostępniającej dane pomiarowe z wykorzystaniem globalnej sieci Internet. Zastosowane rozwiązanie ma na celu umożliwić zdalny pomiar, usprawniający proces pozyskiwania wyników pomiaru. Z kolei wykorzystanie globalnej sieci Internet ma umożliwić zdalny dostęp do wyników pomiarów oraz ich wizualizację. Na początku artykułu przedstawiono krótko poruszaną problematykę, której rozwiązaniem ma być zaprezentowany układ. W kolejnych częściach zaprezentowano schemat ideowy układu oraz omówiono najistotniejsze kwestie dotyczące oprogramowania poszczególnych bloków urządzenia na podstawie schematu blokowego.

SŁOWA KLUCZOWE: karty pomiarowe, mikrokontrolery, transmisja bezprzewodowa, komunikacja klient-serwer, moduły WiFi.

1. WPROWADZENIE

W ostatnich latach technologie bezprzewodowe zyskały bardzo dużą popularność oraz znaczenie w przemyśle i życiu codziennym. Umożliwiają transmisję danych w systemach, w których obiekt pomiaru się przemieszcza, jest znacznie oddalony od głównego kontrolera systemu lub znajduje się w trudno dostępnym miejscu. Transmisja bezprzewodowa znajduje także zastosowanie w systemach, w których można byłoby wykorzystać transmisję przewodową, lecz koszt jej wdrożenia i późniejszej eksploatacji przewyższyłby koszt wykorzystania technologii bezprzewodowej.

Istnieje wiele interfejsów transmisji bezprzewodowej szeroko stosowanych m.in. w przemyśle (wchodzących w skład m.in. systemów IoT – Internet of Things). Do najbardziej znanych można zaliczyć Bluetooth, ZigBee oraz WiFi. Jednym z istotnych parametrów poszczególnych interfejsów jest szybkość transmisji, zasięg oraz wielkość zużycia energii (w przypadku urządzeń zasilanych bateryjnie). Interfejs WiFi oferuje największą szybkość spośród wymienionych krótkodystansowych standardów, lecz jego główną wadą jest duży pobór energii (warto jednak zaznaczyć, że dostępna jest nowa, energooszczędna i długodystansowa wersja standardu WiFi: WiFiHaLow[1]). Został on jednak wybra-

* Politechnika Poznańska

ny do realizacji bezprzewodowej karty pomiarowej w celu spełnienia wstępnych założeń projektowych:

- transmisja informacji powinna być stosunkowo szybka, aby możliwa była jednoczesna, ciągła wizualizacja danych pomiarowych w czasie rzeczywistym ze wszystkich wejść karty pomiarowej,
- urządzenie powinno mieć dostęp do Internetu, aby możliwe było wysyłanie danych do zdalnego serwera www.

Dostarczenie danych do zewnętrznego serwera, znajdującego się w sieci, umożliwi użytkownikowi końcowemu łatwy dostęp do pomiarów. Jedynym wymogiem jest posiadanie urządzenia, które ma dostęp do Internetu oraz ma zainstalowaną przeglądarkę internetową.

Ze względu na korzyści, jakie niesie ze sobą wykorzystanie transmisji bezprzewodowej w systemach pomiarowych oraz udostępnianie wyników pomiarów poprzez Internet, zaproponowane zostało rozwiązanie przedstawione w niniejszym artykule. Warto podkreślić, że koszt zbudowanej karty pomiarowej jest niższy w stosunku do innych specjalistycznych kart dostępnych na rynku, posiadających podobne parametry. Dodatkowo, karta pomiarowa została zaprogramowana w taki sposób, aby dostęp do danych pomiarowych był stosunkowo łatwy i możliwy do zrealizowania na prostym zewnętrznym serwisie.

2. BUDOWA KARTY POMIAROWEJ

2.1. Ogólne założenia funkcjonalne i konstrukcyjne

Pierwszym krokiem podczas realizacji karty pomiarowej było ustalenie ogólnych funkcji, które urządzenie powinno posiadać. Funkcje te są rozszerzeniem wstępnych założeń projektowych. Dla przedstawionej w niniejszym artykule karty pomiarowej, ustalono następujące założenia funkcjonalne:

- możliwość pomiaru napięcia zmiennego/stałego o wartości amplitudy będącej w zakresie dopuszczalnych wartości napięcia dla wejścia przetwornika karty,
- możliwość mierzenia sygnałów napięcia jednocześnie ze wszystkich wejść karty z wykorzystaniem wbudowanych przetworników ADC,
- możliwość wygenerowania sygnałów napięcia jednocześnie na wszystkich wyjściach karty z wykorzystaniem wbudowanego przetwornika DAC,
- wejścia karty pomiarowej nie mogą być w jakikolwiek sposób zależne od wyjść karty pomiarowej, i na odwrót,
- możliwość automatycznego łączenia się do sieci WLAN, które wcześniej zostały zdefiniowane w pamięci mikrokontrolera (warunek: karta umieszczona w obrębie zasięgu danej sieci),
- możliwość komunikacji z serwerem zdalnym www z wykorzystaniem protokołu TCP/IP oraz http,

– możliwość transmisji danych pomiarowych ze wszystkich kanałów jednocześnie w czasie rzeczywistym (odczytywanie pomiarów kolejno z każdego wejścia ADC),

– możliwość konfiguracji ustawień karty poprzez zdalny serwer WWW.

W kolejnym etapie określone zostały założenia konstrukcyjne, umożliwiające osiągnięcie wstępnych założeń funkcjonalnych. Stąd też do konstrukcji karty pomiarowej, przedstawionej w niniejszym artykule, wykorzystano:

– mikrokontroler posiadający wejścia i wyjścia analogowe,

– blok zasilania zawierający baterię oraz układ zabezpieczający cały moduł,

– zewnętrzny moduł pozwalający na bezprzewodowe podłączenie karty do Internetu (poprzez sieć WLAN),

– diodę kontrolną (test komunikacji serwera z kartą).

W celu umożliwienia mierzenia sygnałów z odpowiednią częstotliwością oraz rozdzielczością, wykorzystany mikrokontroler powinien posiadać odpowiednią ilość pamięci RAM (programowa realizacja buforów danych) oraz co najmniej jeden, wielokanałowy przetwornik ADC o stosunkowo dużej rozdzielczości. Przedstawiony prototyp karty pomiarowej został zbudowany na bazie mikrokontrolera z rodziny STM32F4, a ściślej mówiąc na bazie płytki rozwojowej Core407Z posiadającej mikrokontroler STM32F407ZET [2, 3]. Decyzja o wykorzystaniu wymienionego mikrokontrolera została podjęta ze względu na znaczną wielkość pamięci RAM (1024 kB), częstotliwość taktowania procesora (160 MHz) oraz dostępność 12-bitowych przetworników ADC oraz DAC. Dodatkową zaletą tego mikrokontrolera jest m.in. wbudowany moduł DMA (ang. Direct Memory Access) oraz możliwość wykorzystania dodatkowego oprogramowania umożliwiającego proste i szybkie tworzenie kodu na te urządzenia (STM32CubeMX).

Kolejną istotną częścią zrealizowanej karty pomiarowej jest blok zasilania. Pełni on następujące funkcje:

– stabilizacja napięcia (stabilizator liniowy LF33CV),

– ochrona układu przed przeciążeniami (bezpiecznik polimerowy),

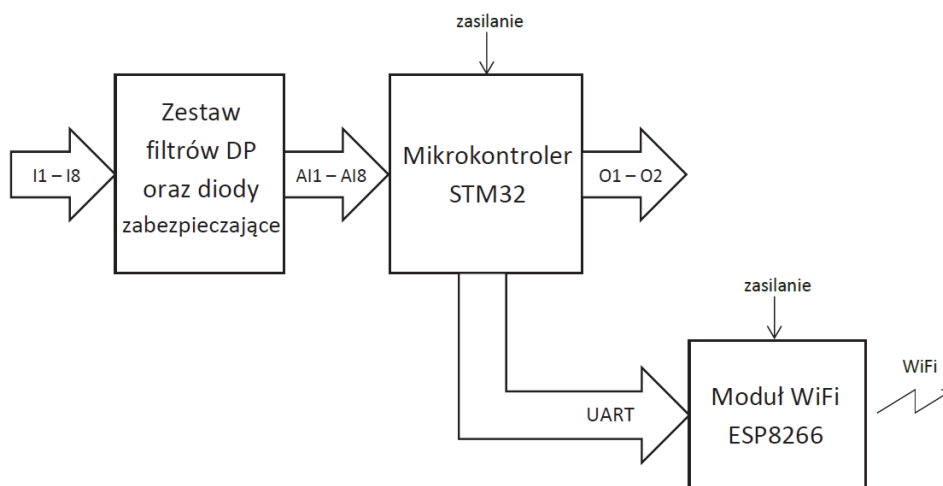
– ochrona układu przed odwrotną polaryzacją (dioda Schottky’ego 1N5818).

Źródłem zasilania układu jest pojedyncza bateria Li-Ion 4,2 V 8800 mAh.

Ostatnim istotnym elementem układu jest moduł komunikacji bezprzewodowej. Można wyróżnić dwa główne kryteria doboru modułu komunikacji: możliwość transmisji bezprzewodowej oraz dostęp do sieci globalnej. Uwzględniając przedstawione kryteria doboru, wykorzystano na potrzeby karty pomiarowej moduł WiFi ESP8266-07. Moduł ten posiada szereg właściwości, które również należało określić na etapie projektowym, tj. napięcie zasilania (3,3 V), standard WiFi – 802.11 b/g/n, możliwość komunikacji z modułem poprzez interfejs UART oraz obsługa protokołu TCP/IP oraz http. Dodatkowo moduł posiada wbudowaną antenę chipową oraz dodatkowe złącze U.FL dla anteny zewnętrznej.

2.2. Schemat blokowy

Schemat blokowy stworzonej karty pomiarowej, na którym znajdują się główne moduły wymienione w założeniach konstrukcyjnych, został zaprezentowany na rys. 1.



Rys. 1. Schemat blokowy zrealizowanej karty pomiarowej [4]
 Oznaczenia: I – Input (wejście), O – Output (wyjście),
 AI – Analog Input (wejście analogowe)

Zbudowana karta pomiarowa posiada 8 wejść analogowych oraz 2 wyjścia analogowe. Pomiędzy wejściami karty pomiarowej a analogowymi wejściami mikrokontrolera znajduje się zestaw filtrów dolnoprzepustowych (DP) RC wraz z diodami Zenera (oznaczone na rys. 1. jako diody zabezpieczające). Zadaniem filtru DP jest tłumienie częstotliwości wyższych niż górna częstotliwość sygnału, jaką może zmierzyć karta – 500 Hz. Aby ograniczyć częstotliwość sygnału do 500 Hz umieszczono filtr DP o następujących parametrach ($R = 100 \text{ k}\Omega$ – przyjęta wartość, $C = 3,3 \text{ nF}$ – obliczona wartość, z uwzględnieniem dostępnymi wartości pojemności kondensatorów ceramicznych). Wartość górnej częstotliwości została eksperymentalnie dobrana, na bazie zrealizowanych testów karty (wraz z uwzględnieniem twierdzenia o próbkowaniu). Zbudowana karta pomiarowa podczas testów (na uczelnianej sieci LAN) umożliwiała przesyłanie ciągłe próbek sygnałów czytywanymi z częstotliwością maksymalnie 1 kHz. Wykorzystanie do transmisji interfejsu WiFi (w którym prędkość przesyłu jest ograniczona i zależna od danej sieci) uniemożliwiło przesyłanie większej ilości próbek na serwer (utrata danych), a co za tym idzie uniemożliwiło mierzenie sygnałów o większej częstotliwości niż 500 Hz. Natomiast samo opóźnienie przesyłu próbek (pojawienie się sygnału w zdalnym panelu użytkownika w odniesieniu do

chwili wysłania żądania pomiarów przez serwer) wynosiło około 1 sekundy. Jednak ze względu na zastosowane bufory cykliczne (na karcie pomiarowej, jak i serwerze zdalnym) sygnał wyświetlany w panelu użytkownika był w sposób ciągły oraz bez utraty danych.

Dodatkowo umieszczona dioda Zenera na każdym wejściu uniemożliwia podanie na przetwornik ADC napięcia o zbyt wysokiej wartości (graniczna wartość 3,3 V). Komunikacja pomiędzy mikrokontrolerem a modułem WiFi odbywa się poprzez interfejs UART. Odebrane dane pomiarowe przez moduł WiFi są w dalszej kolejności przesyłane bezprzewodowo.

2.3. Oprogramowanie karty pomiarowej

Oprogramowanie głównej jednostki zrealizowanej karty pomiarowej – mikrokontrolera, zostało stworzone przy użyciu języka C. Do wygenerowania głównego szablonu aplikacji w tym języku, posłużył program STM32CubeMX [5]. W programie tym definicja urządzeń peryferyjnych, ustawień taktowania poszczególnych linii mikrokontrolera oraz innych ogólnych ustawień realizowana jest poprzez intuicyjny, graficzny interfejs użytkownika. Główną biblioteką użytą w projekcie była biblioteka HAL [6]. Jest to biblioteka dedykowana na mikrokontrolery STM32, która w znaczny sposób usprawnia i ułatwia programowanie tych jednostek.

Kolejnym urządzeniem wykorzystanym w projekcie jest moduł WiFi, którego programowanie wymagało użycia ściśle określonych instrukcji. Wykorzystano do tego celu komendy AT [7, 8], z którymi wgrany domyślnie firmware modułu jest kompatybilny. Funkcje konfiguracyjne modułu ESP zostały zaimplementowane w kodzie mikrokontrolera. Takie podejście umożliwiło dynamiczne konfigurowanie karty WiFi w zależności od potrzeb karty pomiarowej. Funkcje te umożliwiają dynamiczne programowanie modułu ESP poprzez wysyłanie odpowiednich instrukcji AT w formie ciągu znaków. Przykład wykorzystania zaprogramowanej funkcji *ESP_Send_Command*, która wysyła wskazany ciąg znaków do modułu WiFi:

```
ESP_Send_Command("AT", true);
ESP_Send_Command("AT+CWAUTOCONN=0", true);
ESP_Send_Command("AT+CWMODE=1", true);
ESP_Send_Command("AT+CWDHCP=1,1", true);
ESP_Send_Command("AT+CWJAP=\"{ssid}\", \"{haslo}\"",
true);
ESP_Send_Command("AT+CIPMODE=1", true);
```

W funkcji *ESP_Send_Command* zostało zaimplementowane wysyłanie danych tekstowych (tablica znaków) poprzez interfejs UART. Przedstawione komendy AT (widoczne jako pierwszy argument funkcji *ESP_Send_Command*) są

szczegółowo opisane w dokumentacji [7]. Najważniejsze z przedstawionych instrukcji AT to:

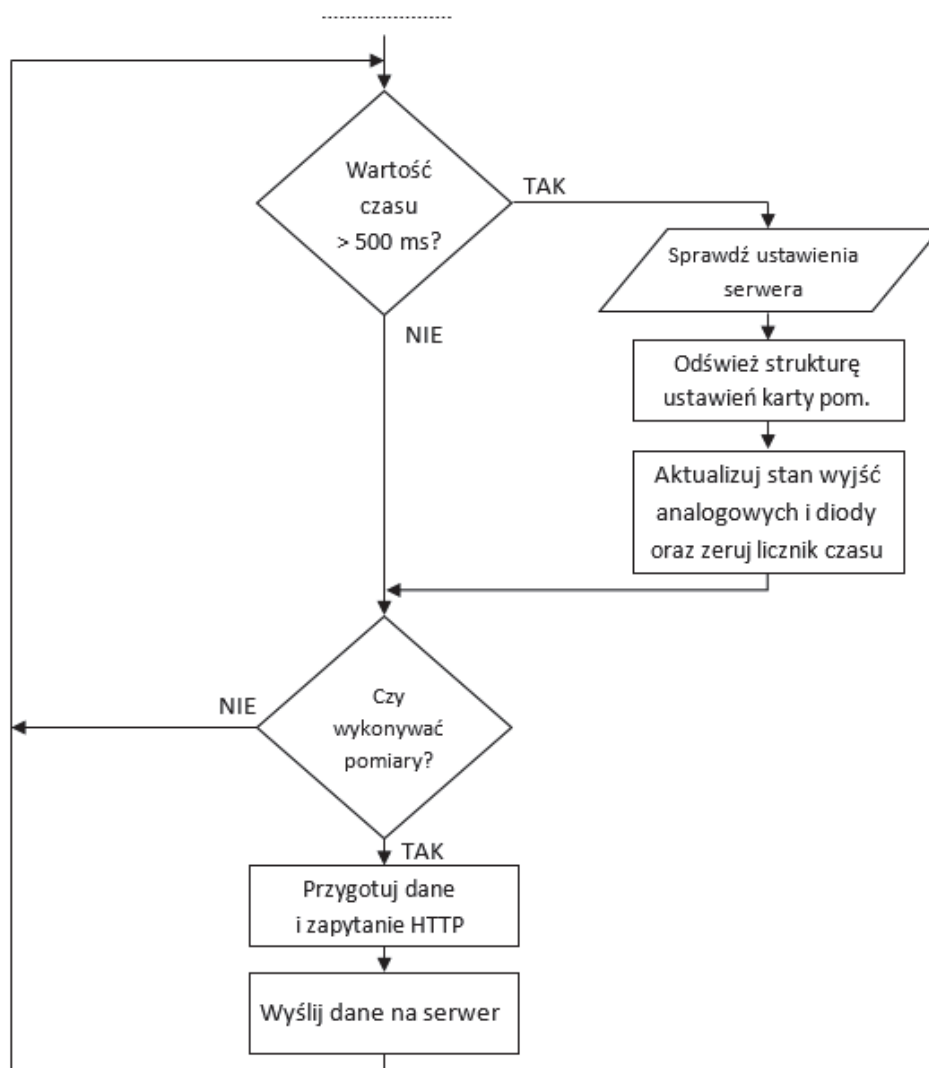
- AT+CWMODE=1: ustawienie trybu pracy modułu jako klient,
- AT+CWJAP="{ssid}\", \"{haslo}\": próba połączenia do lokalnej sieci, której dane (ssid – nazwa sieci, hasło) zostały podane,
- AT+CIPMODE=1: zdefiniowanie trybu odbierania danych przez moduł.

Drugi argument funkcji *ESP_Send_Command* przyjmuje zmienną typu bool, która definiuje konieczność powtórnego wysłania danej instrukcji, w przypadku wcześniejszego niepowodzenia. Jeżeli moduł ESP, po odbiorze danej instrukcji, zwróci kod błędu, wtedy następną z kolei instrukcja nie jest wysyłana. Dla takiego przypadku, obsługa błędu została zaimplementowana w wyższej warstwie aplikacji.

Najistotniejszą częścią stworzonego oprogramowania karty pomiarowej jest główna pętla programu. Jej ogólny algorytm został zaprezentowany na rys. 2. Inicjacja głównej pętli jest poprzedzona wywołaniem funkcji konfiguracyjnych układów peryferyjnych mikrokontrolera oraz modułu ESP. Konfiguracja modułu WiFi składa się z następujących etapów: zdefiniowanie ustawień początkowych modułu, ustanowienie połączenia z lokalną (wcześniej zdefiniowaną) siecią oraz ustanowienia połączenia z serwerem zdalnym. Jeżeli wszystkie podzespoły zostaną skonfigurowane poprawnie, wtedy program przechodzi do głównej pętli. Kluczowymi blokami przedstawionego algorytmu jest przygotowanie danych i zapytania http oraz wysyłanie danych na serwer. Pierwszy blok realizuje konwertowanie zmierzonych wartości za pomocą przetwornika ADC na postać ciągu znaków a następnie uzupełnienie nimi ciała zapytania http (zapytanie http składa się z nagłówka i ciała). Dane wysyłane na serwer mogą być umieszczone właśnie w ciele zapytania http. Format danych zawartych w ciele oraz ich ilość (w oktetach) zapisana jest w nagłówku zapytania. Do tworzenia struktury ciała zapytania wykorzystywany został format JSON (ang. JavaScript Object Notation). Jest to uniwersalny format, który jest szeroko stosowany do wymiany danych w Internecie. Kolejnym etapem jest wysłanie przygotowanego zapytania na serwer www, które realizowane jest w drugim wymienionym bloku.

Zbudowana karta pomiarowa ma możliwość także odbierania danych przesyłanych przez serwer www. Aby to umożliwić, karta pomiarowa wysyła, co ustalone 500 ms, zapytanie na serwer odnośnie jego ustawień. Dzięki temu użytkownik może zaświecić/zgasić diodę kontrolną oraz włączyć generowanie danego sygnału na wyjściach karty pomiarowej. Wykonanie tych czynności przez kartę będzie obciążone maksymalnie 500 ms opóźnieniem w stosunku do momentu kliknięcia przycisków w interfejsie serwera przez użytkownika. Półsekundowy interwał czasowy został ustawiony, aby nie przeciążać serwera nadmiernymi zadaniami. Przesyłane ustawienia serwera zawierają także informację czy użytkownik włączył/wyłączył (poprzez interfejs serwera) pomiar sygnałów na wejściach karty pomiarowej. Umożliwia to dodatkową interakcję użytkowni-

ka z kartą pomiarową. Sprawdzenie tego konkretnego ustawienia zostało przedstawione na algorytmie poprzez blok decyzyjny zawierający pytanie „Czy wykonywać pomiary?”.

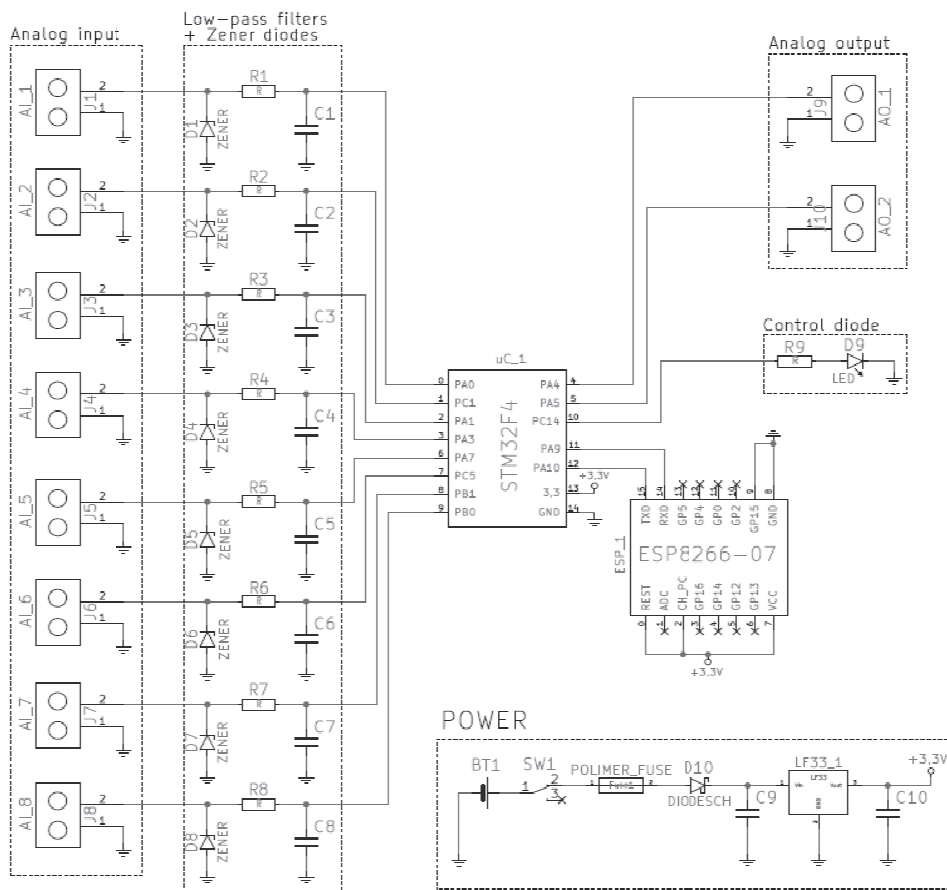


Rys. 2. Algorytm głównej pętli programu karty pomiarowej [4]

2.4. Schemat ideowy

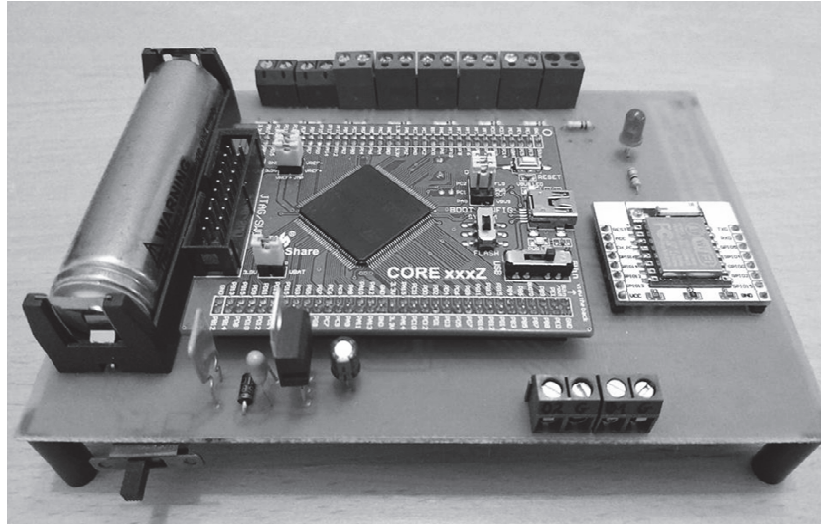
W celu przejrzystego i czytelnego przedstawienia wszystkich modułów zbudowanego układu, pominięto podanie wartości elementów elektronicznych.

Schemat ideowy zrealizowanej bezprzewodowej karty pomiarowej został przedstawiony na rys. 3.



Rys. 3. Schemat ideowy zbudowanej karty pomiarowej

Schemat ten został stworzony w programie Kicad. Program ten posłużył także do wygenerowania niezbędnych plików umożliwiających wytrawienie płytki elektronicznej całego układu. Zmontowany układ elektroniczny zbudowanej bezprzewodowej karty pomiarowej został przedstawiony na rys. 4.



Rys. 4. Układ elektroniczny zbudowanej karty pomiarowej

3. PODSUMOWANIE

Zbudowana karta pomiarowa, dzięki implementacji bezprzewodowej transmisji, umożliwia zdalny pomiar napięcia, dzięki czemu możliwość zastosowania karty jest bardzo szeroka. Wykorzystany w projekcie moduł WiFi umożliwia nie tylko komunikację bezprzewodową, lecz także dostęp do lokalnej sieci WLAN, dzięki której karta pomiarowa ma możliwość udostępnienia wyników pomiarów z użyciem globalnej sieci Internet. Wykorzystanie Internetu umożliwia łatwy dostęp do danych pomiarowych, które udostępniane są w czasie rzeczywistym. Karta pomiarowa została tak zaprogramowana, że komunikacja między użytkownikiem a kartą może odbywać się dwukierunkowo. Klient posiada nie tylko dostęp do pomiarów, lecz także ma możliwość sterowania kartą oraz jej konfiguracji.

Zrealizowany prototypowy układ spełnia w pełni postawione na początku założenia oraz wymagania. Zostało to potwierdzone poprzez szereg wykonanych testów. Komunikacja dwukierunkowa między klientem a kartą pomiarową odbywała się bez żadnych problemów. Wykorzystanie mikrokontrolera posiadającego stosunkowo szybki procesor oraz odpowiednią ilość pamięci RAM umożliwiło udostępnianie danych pomiarowych w czasie rzeczywistym, bez trwania przy tym żadnych próbek. Warto także podkreślić, że optymalizacja oprogramowania zbudowanego prototypu karty oraz zastosowanie wydajniejszego modułu WiFi umożliwiłoby zwiększenie granicznej wartości częstotliwości sygnału, jaką może zmierzyć karta. Tym samym, przedstawiony układ zwiększyłby swoją konkurencyjność w stosunku do innych rozwiązań tego typu, dostępnych na rynku.

LITERATURA

- [1] <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-halow> - ogólny opis standardu WiFiHalow, dostęp 12.2018 r.
- [2] <https://www.waveshare.com/wiki/Core407Z> - strona poświęcona płytce rozwojowej Core407Z, dostęp 12.2018 r.
- [3] <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f405rg.pdf> – dokumentacja STM32F407xx MCU, dostęp 12.2018 r.
- [4] Jęsko W.: Bezprzewodowa sieciowa karta pomiarowa, Praca Dyplomowa Magisterska, Poznań 2018.
- [5] <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html> - strona poświęcona oprogramowaniu STM32CubeMX, dostęp 12.2018 r.
- [6] User Manual, STM32F4 HAL and LL drivers, STMicroelectronics, 2017.
- [7] https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/4/0/3/4A-ESP8266_AT_Instruction_Set_EN_v0.30.pdf - dokumentacja instrukcji AT dla modułu ESP8266, dostęp 12.2018 r.
- [8] https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/4b-esp8266_at_command_examples_en.pdf - dokumentacja prezentująca przykłady użycia instrukcji AT, dostęp 12.2018 r.

WIRELESS NETWORK MEASUREMENT CARD

The article presents a prototype of a wireless network measurement card that share measurement data using the global Internet network. The solution is used to enable remote measurement, that streamlining the process of obtaining measurement results. In turn, the use of the global Internet network is to enable remote access to measurement results and their visualization. At the beginning of the article, briefly discussed issues are presented. The further sections presented the schematic diagram of the system and discuss the most important issues regarding the software of individual device blocks based on the block diagram.

(Received: 25.01.2019, revised: 08.03.2019)