

transmisja bezprzewodowa, standard ZigBee

Krzysztof PODLEJSKI*, Tomasz JOKIEL*

BEZPRZEWODOWA TRANSMISJA DANYCH W STANDARDZIE ZIGBEE – STANOWISKO LABORATORYJNE

Bezprzewodowa transmisja danych pomiarowych na niewielkie odległości eliminuje stosowanie połączeń za pomocą przewodów, szczególnie w trudnych warunkach środowiskowych. Przykładami takiej transmisji są standardy IrDA, Bluetooth, HomeRF. Najmłodszym standardem jest ZigBee przeznaczony dla rozproszonych systemów pomiarowych i monitoringu. Charakteryzuje się bardzo małym zużyciem energii, prostym protokołem, niedużą prędkością transmisji i niskim kosztem urządzeń. Dedykowany jest do systemów o komunikacji w nieregularnych i dużych odstępach czasu. W artykule opisano zbudowany i przebadany system pomiarowy pracujący w standardzie ZigBee wykorzystujący urządzenia firmy Atmel. System przygotowano do wykorzystania w dydaktyce, ale może być zastosowany także dla celów badawczych i utylitarnych po rozszerzeniu aplikacji współpracującej z zaawansowanymi środowiskami wspomagającymi projektowanie systemów pomiarowych.

1. WPROWADZENIE

Standard interfejsu radiowego ZigBee opracowano z przeznaczeniem do rozproszonych systemów pomiarowych i monitoringu. Charakteryzuje się prostym protokołem, małym zużyciem energii, niedużą prędkością transmisji i niskim kosztem urządzeń. Wykorzystywany jest w systemach z nieregularną komunikacją i w dużych lub zmiennych odstępach czasu. Urządzenia jednego systemu zorganizowane są w sieć PAN (ang. *Personal Area Network*), w której przesyłane są dane o niewielkim rozmiarze (np. wynik jednego lub kilku wartości pomiaru ciśnienia, temperatury, wilgotności, sygnały alarmowe, sygnały potwierdzenia wykonania rozkazu itp.) [3], [4], [6]. ZigBee wspiera mechanizmy uwierzytelniania (ang. *authentication*) i szyfrowania transmisji danych poufnych. Możliwe jest dołączenie sieci ZigBee do sieci internetowej. Prostota standardu i jego efektywność to czynniki umożliwiające poznanie zasad

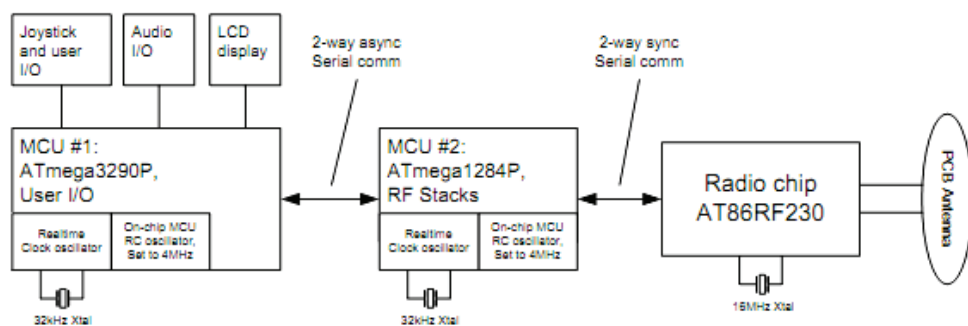
* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, 50-370 Wrocław, ul. Smoluchowskiego 19, krzysztof.podlejski@pwr.wroc.pl

funkcjonowania bezprzewodowego systemu pomiarowego, szczególnie zrozumienie takich pojęć jak: stos protokołów, charakterystyczne urządzenia, sposoby adresowania, topologie sieci, tryby pracy, struktury ramek [7], [15]. Ocena właściwości interfejsu radiowego wymaga wyznaczenia wielu parametrów takich jak charakterystyki widmowe, zużycie energii, określenie jakości łącza zgodnie z wymaganiami odpowiednich norm. Standard IEEE 802.15.4 określa trzy pasma częstotliwościowe do transmisji danych, trzy metody modulacji, techniki rozpraszania widma poprawiające odporność sygnałów na zakłócenia i dwa rodzaje urządzeń sieciowych [13], [14]. W sieci ZigBee urządzenia mogą pełnić trzy role: koordynatora, routera i urządzenia końcowego. Każde urządzenia posiada unikatowy adres (16 lub 64 bitowy). Wyniki pomiarów przesyłane za pomocą ZigBee mogą być analizowane w graficznych środowiskach typu LabVIEW czy DasyLab, wymaga to jednak odpowiedniego interfejsu komunikacyjnego z komputerem lub napisania specjalnej aplikacji.

2. SYSTEM POMIAROWY

2.1. BUDOWA URZĄDZEŃ

Do budowy systemu wykorzystano zestaw RZRAVEN firmy Atmel, który jest rozwinięciem układu nadajnik/odbiornik AT86RF230 pracującego w sieci ZigBee. Zestaw składa się z dwóch mobilnych modułów AVRRAVEN (rys. 1) zasilanych bateryjnie lub z zewnętrznego zasilacza (możliwość pomiaru wartości natężenia prądu i mocy pobieranej przez układ). Bazowymi częściami układu są dwa mikrokontrolery odpowiedzialne za sterowanie wyświetlaczem, peryferiami (AT3290P) i komunikację z układami nadajnika/odbiornika.

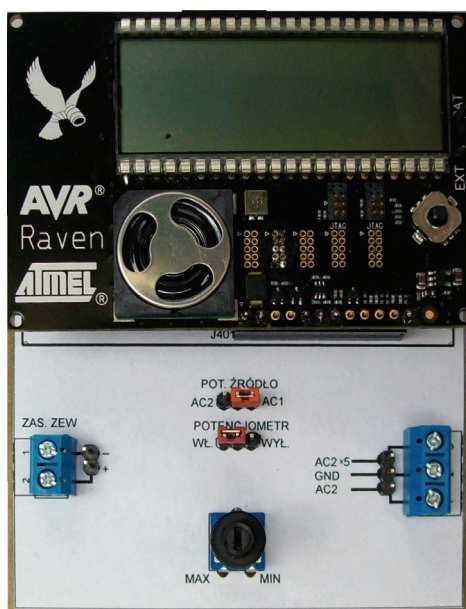


Rys. 1. Schemat blokowy modułu AVRRAVEN [10]

Moduł wyposażono w szereg urządzeń peryferyjnych: wyświetlacz LCD z polem alfanumerycznym i dodatkowymi symbolami, zegar czasu rzeczywistego RTC, gło-

śnik, mikrofon, joystick, termistor. Wyposażony jest także w dwa przetworniki analogowo-cyfrowe. Trzeci moduł zestawu – RZUSBSTICK – wykorzystywany jest do komunikacji z komputerem poprzez port USB i sterowania innymi urządzeniami peryferyjnymi lub komunikacji wykorzystującej interfejs USART mający wejścia zgodne ze standardem TTL. Głównymi elementami modułu jest nadajnik/odbiornik AT86RF230 i mikrokontroler AT90USB1287. System pomiarowy został opracowany przy wykorzystaniu dostarczonej przez producenta platformy *BitCloud* w wersji 1.11. Platforma ta przygotowana jest pod kątem rozwoju oprogramowania warstwy aplikacji (API), posiada sprawdzone i zgodne ze standardami mechanizmy komunikacyjne warstw niższych, wykorzystywane w sieci ZigBee [15]. Platforma *BitCloud* zbudowana jest z warstw. Rdzeń stosu zawiera implementację protokołu sieci ZigBee, pozostałe warstwy implementują funkcjonalności związane ze współdzielonymi usługami (menedżer zadań, zarządzanie energią, menedżer konfiguracji) oraz dostępu do sprzętu HAL i BSP (ang. *Board Support Package*).

Moduł RZUSBSTICK pełni rolę koordynatora w sieci, a moduły AVRRAVEN routera albo urządzenia końcowego. Router oraz koordynator ze względu na pełnione funkcje nie są wprowadzane w stan uśpienia, natomiast urządzenie końcowe wprowadzane jest w stan uśpienia częściowo (układ AT3290P obsługujący wyświetlacz LCD nie jest wprowadzany w stan uśpienia, aby na bieżąco prezentować stan urządzenia). W modułach celowo zrezygnowano z funkcji szyfrowania sprzętowego w celu ograniczenia rozmiarów programu [7]–[12].



Rys. 2. Widok płytki z modułami i dodatkowymi elementami

W celu prowadzenia pomiarów napięcia zewnętrznego oraz ułatwienia dostępu do złącz przetworników wykonano płytkę drukowaną z dodatkowymi elementami (rys. 2). Podstawowy zakres pomiaru napięcia równy napięciu referencyjnemu można rozszerzyć 5-krotnie. Układ jest zasilany bateriami umieszczonymi pod widocznym na rys. 2 modulem lub z zewnętrznego źródła napięcia.

2.2. BADANIE WYDAJNOŚCI I JAKOŚCI ZŁĄCZA RADIOWEGO

Zasięg sieci bezprzewodowej jest kluczowym parametrem systemu i często stanowi główny czynnik decyzyjny dla użytkownika końcowego. Zasięg zależy od wielu czynników np. cech anteny, oprogramowania, środowiska pracy. Oprogramowanie testujące umożliwia regulację parametrów nadajnika, które umożliwiają przeprowadzenie oceny wpływu każdego z czynników, na jakość transmisji. Do oceny wydajności i jakości transmisji radiowej wykorzystuje się następujące testy [8]:

- Pakietowa stopa błędów (PER), umożliwiająca określenie wydajności nadajnika i czułości odbiornika ZigBee. W czasie badań wyznaczany jest wskaźnik siły sygnału odbieranego (RSSI) i wskaźnik jakości złącza (LQI).

Standard IEEE 802.15.4 definiuje pakietową stopę błędów, jako stosunek liczby pakietów błędnie odebranych do liczby wszystkich odebranych pakietów. Pakiet uważany jest za błędny, jeżeli jego suma kontrolna z pola CRC się nie zgadza się z wyliczoną,

- RF TEST przeznaczony do badania charakterystyki widmowej nadajników a w szczególności nadawanie fali na częstotliwości nośnej ± 500 kHz w odniesieniu do częstotliwości środkowej kanału i ciągle nadawanie ramek z losową zawartością,

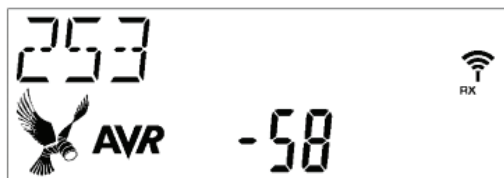
- DC TEST umożliwiający ocenę poziomu zużycia energii.

Oprogramowanie do realizacji powyższych testów działa na modułach AVRRZRZVEN w trybie bezpośredniej komunikacji (bez obecności koordynatora sieci). Wzajemne adresy zostały zapisane w pamięci ROM układów. Oprogramowanie bazuje na wersji 1.0 oprogramowania Raven Radio Evaluation Software.

2.3. PRZYKŁADOWE WYNIKI BADAŃ

Podczas testu PER moduły AVRRRAVEN działają komplementarnie: gdy na pierwszym module uruchamia się test nadawczy (PER TX) drugi moduł musi być wprowadzony w stan odbiorczy testu (PER RX). Nadajnik wysyła zdefiniowaną liczbę ramek w określonym czasie a urządzenie odbiorcze prowadzi pomiary na podstawie odebranej serii ramek. Wszystkie wybierane parametry nadajnika wprowadza się za pomocą menu ekranowego modułu AVRRRAVEN. W badaniach wykorzystano istniejącą w modułach antenę wykonaną w technologii PCB (ang. *Printed Circuit Board*). Podczas przeprowadzania testu na ekranie wyświetlacza LCD wyświetlana jest liczba ramek odebranych poprawnie, odświeżana co 50 ramek ogólnie

odebranych oraz aktualny poziom mocy sygnału odbieranego (RSSI – ang. *Receive Signal Strength Indication*) w dB, natomiast ikona zasięgu pokazuje w sposób graficzny poziom odbieranej mocy. Przykładowy ekran podczas przeprowadzania testu został przedstawiony na rys. 3. Ekran prezentuje aktualną chwilę testu po odebraniu 253 poprawnych ramek i wartość RSSI wynoszącą – 58 dB, po prawej stronie znajduje się symbol zasięgu wskazujący bardzo dobry poziom odbieranego sygnału (RSSI > 15).

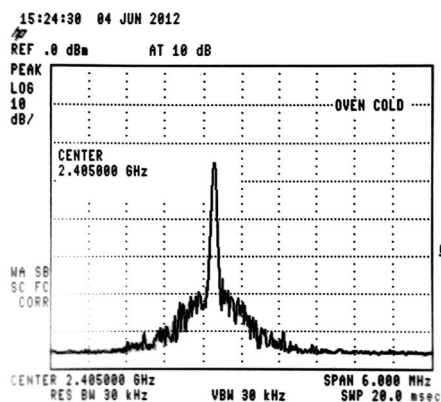


Rys. 3. Przykładowy widok wyświetlacza odbiornika podczas testu PER

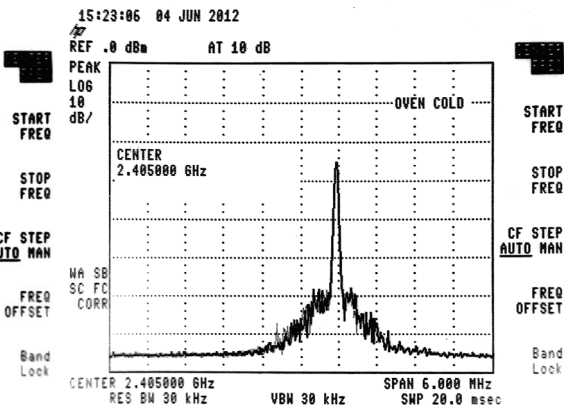
Odczyt wyników testu dokonuje się w urządzeniu odbiorczym wchodząc w menu „WYNIKI”, który zawiera minimalne, uśrednione i maksymalne wartości poziomu mocy odbieranej RSSI oraz wskaźnik jakości łącza LQI (ang. *Link Quality Indication*), obliczone w trakcie trwania testu. Rezultaty wyników przechowywane są w pamięci RAM modułu i są nadpisywane przy uruchomieniu kolejnego testu [6], [8]. Podstawowym zadaniem badań RF TEST jest określanie parametrów nadajnika w celu zbadania jego zgodności z regulacjami prawnymi dotyczącymi radionadajników (agencjami dokonującymi regulacji w tej dziedzinie są m.in. ETSI – *European Telecommunications Standards Institute* oraz FCC – *Federal Communications Commission*). Badany układ nadajnik/odbiornik został opracowany w zgodności z standardem IEEE 802.15.4, który charakteryzuje m.in. brak emisji mocy radiowej w spoczynku, uruchamianie nadajnika tylko na czas wysłania ramki. Taki nieciągły tryb transmisji sprawia, że pomiar charakterystyk, za pomocą np. analizatora widmowego jest utrudniony. Aby ułatwić pomiary w trybie testowym ramki wysyłane są nieprzerwanie jedna za drugą. Zawartość danych wysyłanych ramek również ma wpływ na kształt widma nadawanego sygnału. W celu zmniejszenia tego wpływu wysyłane wartości są losowe i zmieniają się w kolejnych ramkach. Przykładowe wyniki testów, przeprowadzonych w trybie ciągłego nadawania przedstawiono na rys. 4–7.

Tryb – 500 kHz przedstawia widmo sygnału emitowanego na częstotliwości przesuniętej o 500 kHz poniżej częstotliwości środkowej kanału 2,405 GHz.

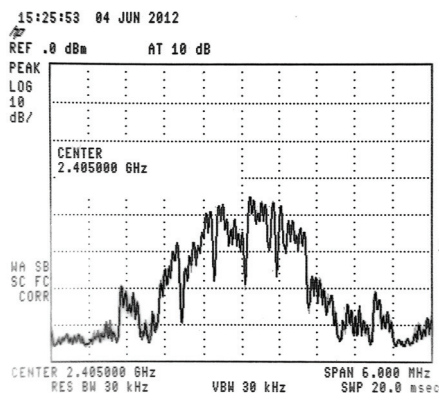
Tryb +500 przeprowadzono dla kanału 11 i maksymalnej mocy nadajnika. Podobnie jak w poprzednim przykładzie przedstawiono widmo sygnału emitowanego na częstotliwości przesuniętej o 500 kHz powyżej wybranego kanału 2,405 GHz.



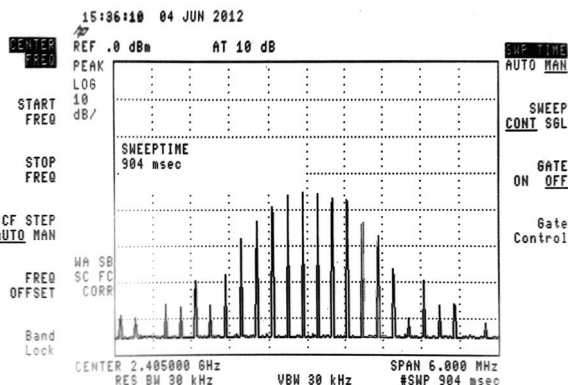
Rys. 4. Spektrogram dla trybu ciągłego nadawania
– 500 kHz



Rys. 5. Spektrogram dla trybu ciągłego nadawania
+500 kHz



Rys. 6. Spektrogram dla trybu „modulacja”



Rys. 7. Spektrogram dla trybu
szybkiego nadawania

Spektrogram „modulacja” przedstawia widmo sygnału dla kanału 11, otrzymanego poprzez modulację częstotliwości nośnej losowymi ciągami danych, które nie tworzą struktury ramki.

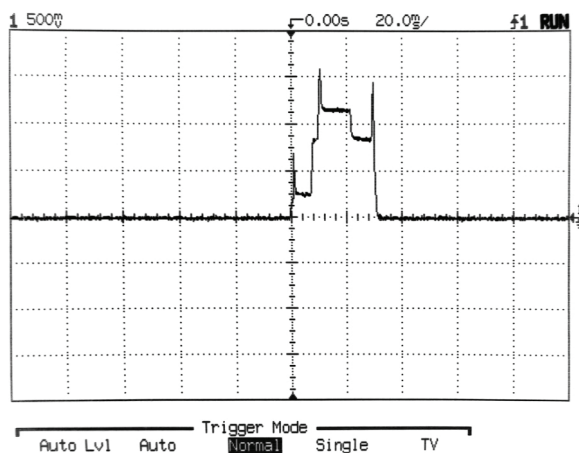
Na rysunku 7 przedstawiono widmo sygnału otrzymanego podczas transmisji danych o strukturze ramki zgodnej ze standardem IEEE 802.15.4, wysyłanych w sposób ciągły.

DC TEST umożliwia zaznajomienie się z typową dla ZigBee charakterystyką pracy i umożliwia pomiar średniego zużycia energii, i oszacowanie zakładanej długości pracy dla systemu zasilanego bateryjnie. Podczas testu urządzenie pracuje w stanie uśpienia, wyświetlacz LCD zostaje wyłączony w celu minimalizacji poboru prądu, na krótki czas moduł wybudza się, wysyła ramkę danymi i powraca do stanu uśpienia.

Cykl testowy powtarza się co 5 s – czas ten umożliwia użytkownikowi pomiar zużycia prądu. Moduł pozostaje w trybie testu tak długo, aż nie zostanie on przerwany poprzez wciśnięcie centralnego przycisku joysticka.

Test można przeprowadzić manipulując w kolejnych próbach parametrami transmisji i badając ich wpływ na końcowe zużycie energii. Możliwe do zmiany parametry uwzględniane podczas testu to: numer kanału, długość pojedynczej ramki z danymi, poziom mocy wyjściowej nadajnika.

Przykładowy kształt przebiegu poboru prądu przy pracy z okresami uśpienia i wybudzania układu przedstawia rys. 8, na którym można zaobserwować moment wzbudzenia układu sterującego, generację losowej zawartości pola danych, uruchomienie układu transceivera, wysłanie ramki oraz odbiór potwierdzenia.



Rys. 8. Przebieg poboru prądu w okresie wzbudzenia i uśpienia układu

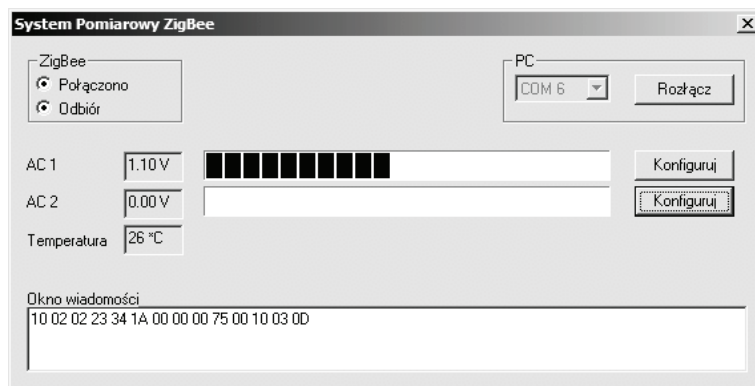
Na podstawie otrzymanych wyników obliczono średnie zużycie prądu przez badane urządzenie, wynosi ono około 74 µA, co implikuje przewidywany czas pracy baterii o pojemności 950 mAh na około 1,5 roku, przy względnej aktywności układu rzędu 10% (dla celów badawczych względna aktywność typowa została wydłużona).

2.4. ODCZYT STANU PRZETWORNIKÓW

Wizualizacja odczytów (rys. 9) wyjść przetworników analogowo-cyfrowych została zrealizowana za pomocą napisanej aplikacji przy wykorzystaniu interfejsu *Windows API* [2], [5].

Aplikacja łączy się z modulem RZUSBSTICK poprzez wirtualny port szeregowy. W dolnej części okna głównego znajduje się „Okno wiadomości”, w którym wyświetlane są dane bezpośrednio odebrane przez wirtualny port szeregowy w postaci liczb hek-

sadecymalnych. Wyświetlanie nieprzetworzonych danych może być pomocne przy tworzeniu innych aplikacji współpracujących z zestawem RZRAVEN, np. w graficznym środowisku programistycznym *LabVIEW*, za pomocą opracowanego formatu ramki.



Rys. 9. Główne okno aplikacji System Pomiarowy ZigBee

3. UWAGI I WNIOSKI

Do realizacji transmisji w standardzie ZigBee wybrano proste i tanie moduły, ale posiadające większość przydatnych funkcji i cech. Praktyczne zastosowanie modułów wymagało wykonania w części sprzętowej płytek drukowanych ze specjalnymi złączami, potencjometrami, zworami i pojemnikami na baterie oraz zidentyfikowania i poprawienia błędnych połączeń w oryginalnych płytkach samych modułów. Działanie systemu wymagało napisania oprogramowania modułów w środowisku *Microsoft Visual Studio 2010* z kompilatorem AVR GCC instalowanym z pakietem WinAVR (wersja 20100110). Program składa się z dwóch części: *Pomiar wydajności i jakości łącza radiowego* oraz *System pomiarowy*. Ze względu na ograniczoną funkcjonalność zrezygnowano z dostarczanego przez producenta środowiska *AVR Studio 4.18*.

Przeprowadzone eksperymenty związane z oceną wydajności i jakości łącza potwierdzają spełnienie wymagań prawnych. Dla celów dydaktycznych należało jednak skorygować warunki transmisji w taki sposób, aby możliwa była obserwacja i rejestracja spektrogramów zgodnie z zadawanymi parametrami testu.

Dodatkową zaletą wykonanego systemu pomiarowego jest możliwość podawania zewnętrznego sygnału napięciowego, którego poziom może być zmieniany w zadanym zakresie wartości. Umożliwia to dołączenie do układu analogowych wyjść przetworników pomiarowych w szerokim zakresie napięć (do 5-krotnej wartości napięcia referencyjnego). Dla komputera napisano program „*System Pomiarowy ZigBee* w środowisku *Bloodshed Dev-C++ 5.2.0.2* cechujący się prostym interfejsem oraz

możliwością budowania aplikacji bez użycia dodatkowych bibliotek z możliwością uruchomienia zarówno na komputerze z systemem operacyjnym *Windows XP*, jak i *Windows 7*. Aplikacja *System Pomiarowy ZigBee* umożliwia wizualizację i rejestrację danych pomiarowych z przetworników analogowo cyfrowych modułów. Rozszerzenie protokołu komunikacyjnego z komputerem jest podstawą do rozbudowania aplikacji o kolejne funkcje w profesjonalnym środowisku do wizualizacji zmian wartości wielkości fizycznych i akwizycji danych.

Zrealizowany system w standardzie ZigBee umożliwia transmisję zarówno w trybie punkt-punkt jak i rozproszonym. System cechuje się skalowalnością i sieć bez wprowadzania modyfikacji w oprogramowaniu modułów może być rozbudowywana a automatyczna konfiguracja nie wymaga dodatkowych działań w celu jej uruchomienia. Rozmiar sieci ograniczony jest konfiguracją określoną przez użytkownika, którą można w łatwy sposób zmienić nie ingerując w wewnętrzne struktury oprogramowania. System zyskałby na funkcjonalności po dołączeniu cyfrowego interfejsu komunikacyjnego modułów peryferyjnych, dzięki któremu możliwa byłaby komunikacja z czujnikami udostępniającym wyniki pomiarów w postaci cyfrowej.

LITERATURA

- [1] BARANOWSKI R., *Mikrokontrolery AVR ATmega w praktyce*, BTC, Warszawa 2005.
- [2] BESTA P., *Visual Studio 2005, programowanie z Windows API w języku C++*, Helion, Gliwice 2008.
- [3] DYE M.A., MC DONAJD R., RUFİ A.W., *Akademia sieci Cisco CCNA Exploration*, PWN, Warszawa 2010.
- [4] NAWROCKI W., *Rozproszone systemy pomiarowe*, WKŁ, Warszawa 2006.
- [5] SNELL M, POWERS L., *Microsoft Visual Studio 2010 Księga eksperta*, Helion, Gliwice 2011.
- [6] WESOŁOWSKI K., *Systemy radiokomunikacji ruchomej*, WKŁ, Warszawa 2006.
- [7] *Low Power 2.4 GHz Transceiver for ZigBee, IEEE 802.15.4, LoWPAN, RF4CE and ISM Applications – AT86RF230*, 2/2009.
- [8] *Raven Radio Evaluation Software*, Application Note, AVR2002, 7/2008.
- [9] *AT86RF230 Software Programmer's Guide*, Application, Note AVR2001, 7/2007.
- [10] *RZRAVEN Hardware User's Guide*, Application Note, AVR2016, 4/2008.
- [11] *Free Ebook AVR2050*.
- [12] *Free Ebook AVR2052*.
- [13] IEEE 802.15.4: *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*, Sept. 2006.
- [14] IEEE 802.15.3: *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*, 2003.
- [15] <https://www.zigbee.org>

WIRELESS DATA TRANSMISSION STANDARD ZigBee – LABORATORY STAND

This article describes a developed and tested measuring system working in the ZigBee technology and using Atmel modules. The system is intended to be used in teaching, but it can also be used for re-

search and utilitarian purposes after extending the application working with advanced graphical programs for the design of measuring systems. The system's operation required developing module software in the *Microsoft Visual Studio 2010* environment. The *ZigBee Measuring System* software has been developed for the PC in the *Bloodshed Software Dev-C++ 5.2.0.2* environment. Conducted experiments related to the evaluation of the efficiency and quality of the link confirm compliance with legal requirements. However, for teaching purposes, transmission conditions had to be adjusted to allow for observation and recording of spectrograms in accordance with the set parameters.