

Piotr **BAZYDŁO**  
Szymon **DĄBROWSKI**  
Roman **SZEW CZYK**

## MODELE MATEMATYCZNE WYBRANYCH PARAMETRÓW TRANSMISJI RADIOWEJ W OPARCIU O MODUŁY IQRF

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono prototyp bezprzewodowego systemu wymiany danych oparty na modułach radiowych IQRF na przykładzie pomiaru temperatury oraz badania związane z efektywnością systemu w warunkach przemysłowych bądź cywilnych. Na artykuł składają się dwie główne części: część praktyczna oraz część badawcza. Część praktyczna opisuje podstawowe zasady działania zaprojektowanego systemu, użyte komponenty oraz procedury pomiarowe. Część badawcza przedstawia modele matematyczne i charakterystyki wybranych parametrów transmisji radiowej (efektywność, przepustowość) w zróżnicowanych warunkach środowiskowych. Badania przepustowości, która była przyjęta jako wyznacznik jakości transmisji, prowadzone były w warunkach przemysłowych (korytarz o długości 120 m z pracującą w pobliżu aparaturą przemysłową). W warunkach cywilnych (budynek biurowy), zbadano efektywność transmisji (stosunek odebranych pakietów do pakietów wysłanych razy 100%). Szczególne znaczenie mają badania dotyczące efektywności w budynku biurowym, z dużą ilością pomieszczeniem odgradzonych ścianami. Wyniki tych badań umożliwiają modelowanie sieci wymiany danych za pomocą uzyskanych modeli matematycznych oraz znajomości opisanego w artykule algorytmu routingu Discovery IQMESH. Ponadto, testy w warunkach przemysłowych zostały wykonane dla trzech różnych wersji modułu: antena PCB 868 MHz, antena zewnętrzna 868 MHz oraz antena zewnętrzna 433 MHz.

**Słowa kluczowe:** IQRF, transmisja radiowa, radiowa wymiana danych, modele parametrów transmisji radiowej.

### 1. WSTĘP

Rozproszone systemy wymagają często wydajnej i efektywnej wymiany danych pomiędzy poszczególnymi komponentami. W miejscach trudno dostępnych lub dużych budynkach cywilnych (np. biurowce), przewodowa transmisja danych może okazać się kłopotliwa, szczególnie w przypadku rozszerzania systemu lub wprowadzania modyfikacji w jego strukturze. W tym przypadku, warto skorzystać z bezprzewodowych protokołów wymiany danych opartych na komunikacji radiowej, która mimo upływu lat odznacza się wieloma zaletami. Jednym z najbardziej popularnych standardów komunikacji radiowej dla zastosowań przemysłowych, naukowych oraz domowych w pasmach ISM jest tani standard ZigBee[1,2]. Jednakże, cechuje się on dużym stopniem skomplikowania i jego implementacja w przypadkach systemów o niskim stopniu złożoności może być nieopłacalna. Z pomocą może przyjść wtedy platforma IQRF[3] i zaimplementowany protokół wymiany danych IQMESH. Dzięki modułom radiowym wyposażonym w mikrokontroler, urządzenia te mogą zarówno obsługiwać urządzenia zewnętrzne (np. czujniki), jak i odpowiadać za wymianę informacji między poszczególnymi węzłami sieci radiowej.

Artykuł przedstawia prototypowy system bezprzewodowego pomiaru temperatury, przy użyciu modułów radiowych IQRF TR-52D oraz czujników temperatury typu 1-wire Dallas DS18B20 pracujących w trybie pasożytniczym[4]. System ten został docelowo zaprojektowany pod kątem automatycznego systemu wiązania betonu. Ponadto w artykule

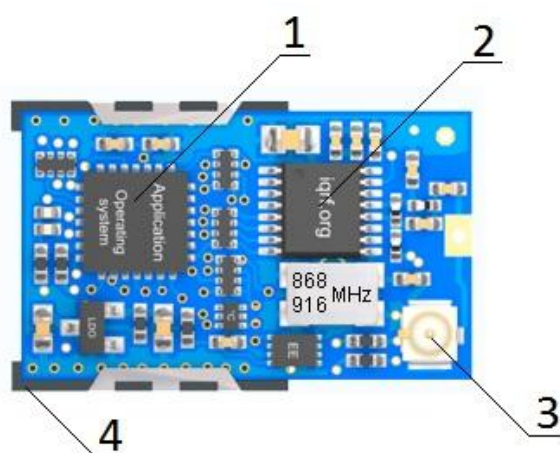
zawarte zostały badania systemu pod kątem jego efektywności i przepustowości wysyłania danych. Testy przeprowadzono w dwóch innych przypadkach środowiska pracy. Na podstawie badań wyznaczono modele matematyczne, które są kluczowe pod względem modelowania sieci radiowej. Umożliwiają one szybkie prototypowanie struktury oraz pozwalają przewidzieć wskaźniki jakościowe transmisji w danych warunkach.

## 2. OPRZYRZĄDOWANIE BADAWCZE – MODUŁY RADIOWE IQRF

Do badań parametrów transmisji radiowej wykorzystano moduły radiowe TR-52D firmy IQRF pracujące w trzech częstotliwościach pasma ISM (433, 868 oraz 916 MHz). Mogą one pracować zarówno w trybie nadajnika, jak i odbiornika. W dodatku, cechują się małymi wymiarami, niskim poborem prądu oraz niewielką ceną. Główną zaletą modułów jest zaimplementowany system operacyjny oraz udostępnione przez producenta API umożliwiające łatwe i szybkie tworzenie aplikacji o zróżnicowanym poziomie zaawansowania. Moduły są produkowane w dwóch wersjach:

- z wbudowaną anteną PCB o zysku 1.74 dBi i maksymalnej mocy wyjściowej 0.1 W,
- z przylutowanym złączem U.LF umożliwiającym przyłączenie do układu dowolnej zewnętrznej anteny.

Rysunek 1 przedstawia moduł TR-52D z wyszczególnionymi głównymi komponentami.



**Rys. 1. Moduł radiowy TR-52D w wersji ze złączem U.LF**

1 - mikroprocesor PIC16LF1938, 2 - MRF49XA moduł pasma ISM,  
3 – złącze antenowe U.LF, 4 złącze SIM [5]

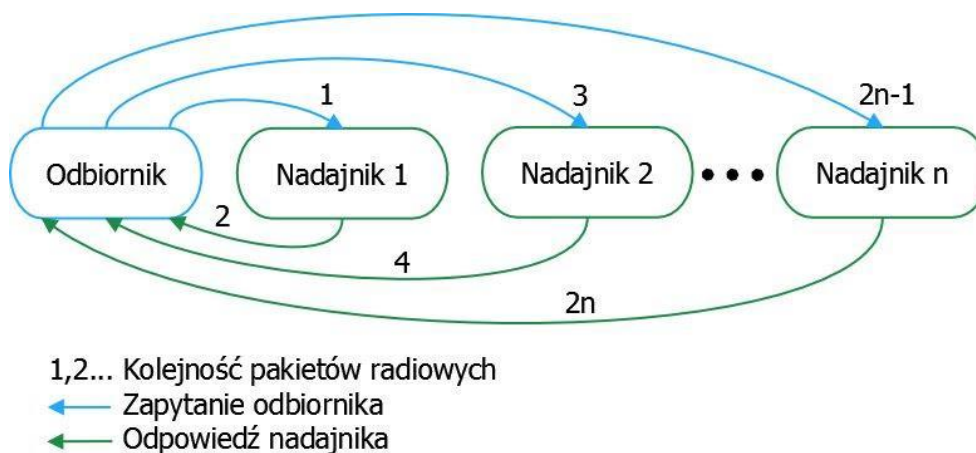
Modułem zarządza jednostka PIC16LF1938 wyposażona w 28KB pamięci flash i 8-bitowy rdzeń taktowany zegarem z częstotliwością 32MHz. Całość została zorganizowana w taki sposób, aby moduł mógł być zainstalowany w urządzeniu przy pomocy złącza SIM. Podstawowe parametry techniczne modułu:

- napięcie zasilania 3.1-5.3V,
- temperatura pracy - 40 – 85 °C,
- pobór prądu:
  - nadawanie 14-24 mA w zależności od ustawionej mocy sygnału wyjściowego,
  - odbiór 13 mA w standardowym trybie pracy,

- maksymalna szybkość transmisji 86.2 kB/s,
- standardowa czułość -110 dBm,
- standardowa moc nadawania +7dBm.

### 3. ROZPROSZONY SYSTEM POMIARU TEMPERATURY

Przebadane moduły zostały zastosowane w rozproszonym systemie pomiaru temperatury. System składa się z co najmniej czterech nadajników, których zadaniem jest nadzór pracy cyfrowego czujnika oraz jednego odbiornika, pełniącego rolę koordynatora sieci. Układ cechuje się prostą zasadą działania, która została zilustrowana na rysunku 2.



**Rys. 2. Schemat obrazujący zasadę działania systemu pomiarowego**

Odbiornik, po rozpoczęciu pracy, sprawdza aktualny stan sieci – ilość powiązanych nadajników, stan baterii poszczególnych węzłów, ilość wolnych adresów itp. W przypadku występowania odstępstw od normalnej pracy systemu użytkownik natychmiastowo zostaje o tym powiadomiony. Warunkiem prawidłowej pracy układu jest obecność przynajmniej czterech węzłów w pamięci odbiornika. Procedura wiązania nadajników z koordynatorem sieci, odbywa się przy pomocy przycisku znajdującego się w układzie odbiornika oraz diod sygnalizujących postęp całego procesu. Adresy poszczególnych węzłów są zapisywane w pamięci EEPROM, co ogranicza ilość możliwych resetów sieci do ok. miliona powtórzeń. Dodatkowo przypisane adresy są wykorzystywane w obliczaniu odstępu czasowego między kolejnymi pakietami radiowymi z zapytaniem o temperaturę. Brak skomplikowanego algorytmu dynamicznego wyliczania adresu węzła w sieci, w zależności od jego położenia, znacznie przyspiesza pracę całego systemu. Czas potrzebny na zmierzenie aktualnej wartości temperatury jest determinowany czasem potrzebnym na konwersję temperatury przez zastosowany czujnik (w obecnej wersji systemu: Dallas DS18B20 z czasem konwersji około 750 ms dla najwyższej rozdzielczości pomiaru).

Kolejną cechą systemu pomiarowego jest modułowa budowa poszczególnych urządzeń. Nadajnik składa się z modułu radiowego, obudowy, układu scalonego ze złączem SIM i baterią oraz czujnika temperatury. W przypadku odbiornika złącze na czujnik zostało zastąpione złączem do transmisji RS232. Takie rozwiązanie pozwala na szybką zmianę oprogramowania urządzenia oraz ekonomiczną wymianę uszkodzonych elementów. Na rysunku 3 przedstawiono fotografię nadajnika i odbiornika:



**Rys. 3. Fotografia przedstawiająca nadajnik systemu pomiarowego, bez obudowy**

System pomiarowy może znaleźć zastosowanie zarówno w przemyśle, jak i zastosowaniach cywilnych. Ze względu na niewielkie wymiary, możliwość pracy w zamkniętych pomieszczeniach oraz wydajność energetyczną, zastosowania układu mogą być następujące:

- instalacje inteligentnych budynków[6];
- w silosach, kontenerach i innych obiektach przeznaczonych do składowania lub transportu;
- w wagonach pojazdów szynowych – możliwość oczujnikowania całego pociągu;
- w trudno dostępnych i niebezpiecznych dla człowieka miejscach.

W przyszłości planowana jest rozbudowa systemu pomiarowego o pomiar wilgotności otoczenia, zaimplementowanie drugiego trybu pracy w technologii IQMESH, umożliwiającej dynamiczną alokację adresów węzłów oraz cyfrowe wyjścia sterujące.

#### **4. METODYKA BADAWCZA**

Badania polegały na sprawdzeniu dwóch podstawowych parametrów funkcjonalnych transmisji radiowej: efektywności transmisji i przepustowości łącza, w różnorodnych warunkach przesyłu danych. Przepustowość mierzona w bitach na sekundę, była wyliczana na podstawie zależności:

$$C = \frac{n * 32}{t} \left[ \frac{bit}{s} \right] (1)$$

Gdzie:

C – przepustowość

n – ilość odebranych pakietów

t – czas potrzebny na odebranie pakietów

Wartość 32 wynika z rozmiaru jednego pakietu, który wynosi 4 bajty (32 bity).

Efektywność rozumiana jako procent odebranych pakietów w stosunku do ilości pakietów wysłanych, obliczano z równania:

$$E = \frac{P_o}{P_w} * 100\% \quad (2)$$

Gdzie:

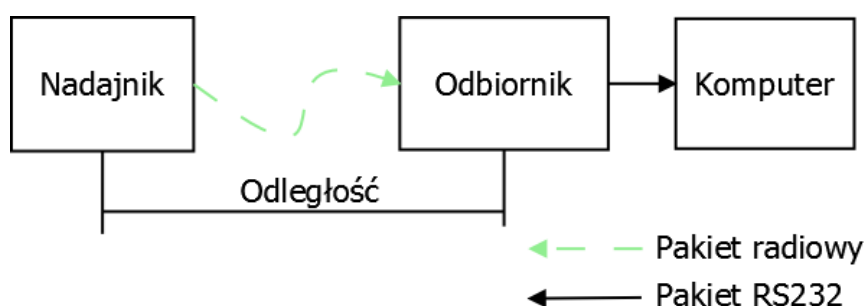
E – efektywność transmisji

$P_o$  – ilość pakietów odebranych

$P_w$  – ilość pakietów wysłanych

RSSI (Received Signal Strength Indication) rejestrowane było za pomocą funkcji udostępnionej w systemie operacyjnym modułu. Po odebraniu jakiegokolwiek pakietu radiowego z sieci wartość była przeliczana przez procesor i zwracana jako procentowy wskaźnik mocy między nadajnikiem a odbiornikiem. Jako wskaźnik jakości transmisji przyjęto przepustowość łącza ze względu na przyszłe zastosowania modułów radiowych. Przepustowość na poziomie większym niż 350 bit/s świadczyła o dobrej kondycji łącza.

Schemat blokowy stanowiska badawczego został przedstawiony na rysunku 4. Badania polegały na stopniowym zwiększaniu odległości między nadajnikiem a odbiornikiem w trakcie wysyłania pakietów danych. Odbiornik połączony z komputerem PC miał za zadanie zwracać do komputera odpowiednie wartości: ilość odebranych pakietów w przypadku efektywności oraz czas potrzebny na odebranie określonej ilości pakietów w przypadku przepustowości. Badania zostały przeprowadzone w standardowych warunkach pracy układów radiowych – zamknięte pomieszczenie w obecności innych sygnałów radiowych.

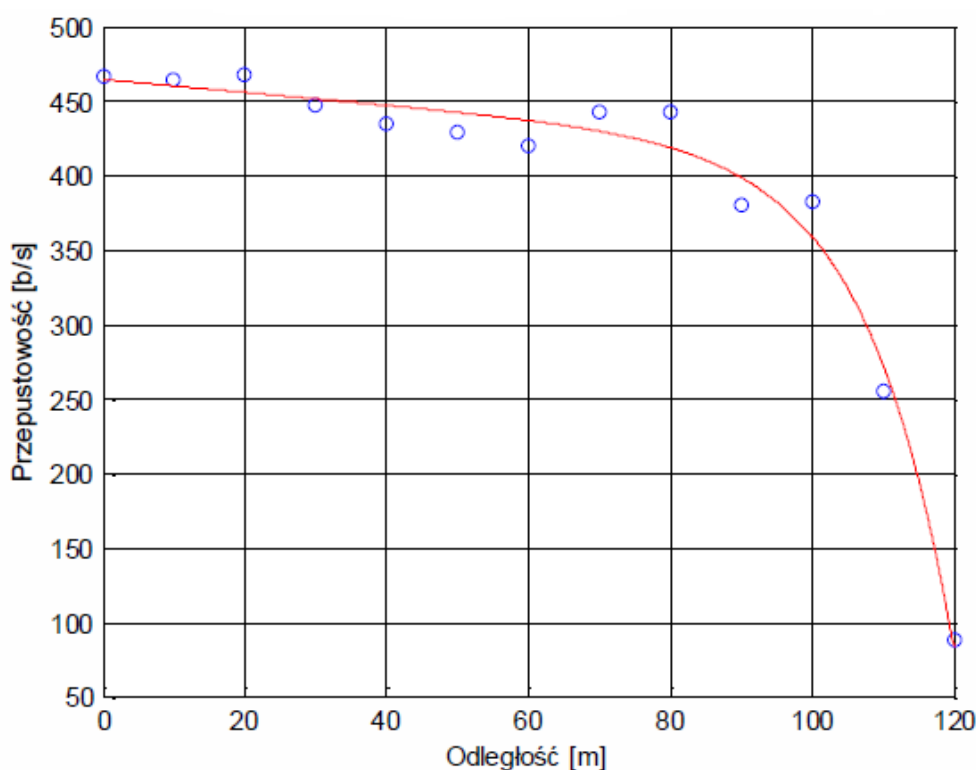


**Rys. 4. Schemat blokowy przedstawiający sposób wykonywania badań oraz kierunek przepływu danych w pomiarach**

Celem badań było wyznaczenie modeli matematycznych wybranych charakterystyk transmisji radiowej pozwalających na szybką symulację i modelowanie sieci radiowych w określonych warunkach pracy. Dodatkowo wyniki pozwoliły określić podstawowe parametry takie jak: zasięg i stabilność transmisji rozproszonego systemu pomiaru temperatury opisanego poniżej.

## 5. BADANIA TRANSMISJI RADIOWEJ

Pierwszym z środowisk był korytarz o długości wynoszącej 140 metrów. Jako że w pomieszczeniach sąsiednich znajdowała się różnorodna aparatura przemysłowa, sklasyfikowano te warunki jako przemysłowe. Ponadto, przez środek tunelu przebiegała instalacja elektryczna. Głównym badanym parametrem podczas testów była przepustowość. W aplikacjach przemysłowych, czas reakcji na zdarzenie jest często bardzo istotnym czynnikiem. W związku z tym, istotną informacją z punktu widzenia projektanta jest czas, w jakim określona liczba danych dociera do koordynatora procesu. Ze względów bezpieczeństwa, pakiety danych wysyłanie są wielokrotnie (aby zapobiec utracie danych poprzez np. losowe zakłócenia), a na podstawie przepustowości można estymować progi efektywności. Testy wykonano dla dwóch różnych modułów radiowych: z anteną PCB 868MHz oraz anteną zewnętrzną 433MHz.

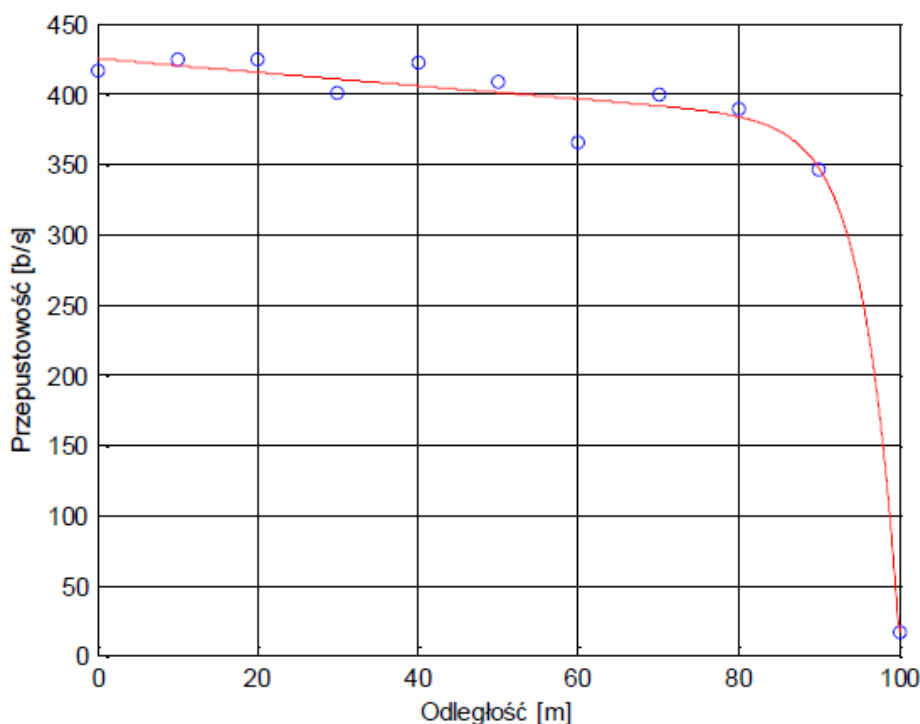


**Rys. 5. Charakterystyka przepustowości w funkcji odległości – antena PCB 868MHz**

Model matematyczny przepustowości:

$$P = -0,02e^{0,081*x} + 464,3e^{-9,1*10^{-4}*x} \wedge x \in < 0,120 > \quad (3)$$

Rysunek 5 przedstawia charakterystykę przepustowości w funkcji odległości dla zastosowanego modułu z anteną PCB 868MHz oraz aproksymację wykładniczą, tworzącą model matematyczny parametru. Najwyższa wartość osiągniętej przepustowości osiągnęła niewiele ponad 450 bitów na sekundę. Przepustowość w głównej mierze opadała wraz z wzrostem dystansu między odbiornikiem a nadajnikiem. Charakterystyka obrazuje wpływ losowych zakłóceń wynikających z aparatury pracującej w pobliżu stanowiska badawczego (szczególnie między 30 a 70 metrem). Na 120. metrze wartość przepustowości wynosiła około 120 b/s. Za 120. metrem, żaden pakiet nie docierał do koordynatora, tak więc efektywność i przepustowość osiągnęły wartość zerową.



**Rys. 6. Charakterystyka przepustowości w funkcji odległości – antena zewnętrzna 433MHz**

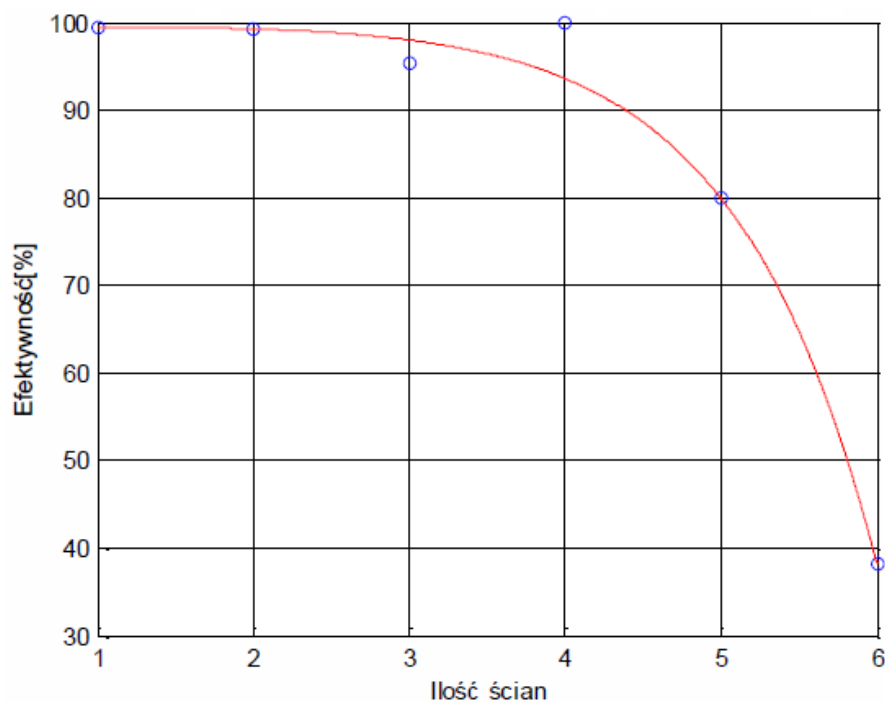
Model matematyczny przepustowości:

$$P = -3 * 10^{-8} e^{0,231*x} + 425,1 e^{-10^{-3}*x} \wedge x \in < 0,100 > \quad (4)$$

Rysunek 6 przedstawia charakterystykę przepustowości w funkcji odległości dla modułu radiowego z anteną zewnętrzną 433MHz oraz aproksymację wykładniczą. W porównaniu do anteny PCB 868MHz, początkowa wartość badanego parametru wynosi o 50 b/s mniej. W dodatku, widoczne są zakłócenia w tych samych punktach pomiarowych (0, 30, 60). Jednakże, na 40. i 50. metrze zakłócenia nie wystąpiły, tak więc moduł wykazał się lepszą odpornością na zakłócenia. Na setnym metrze, przepustowość osiągnęła wartość 20 bitów na sekundę. Na dalszych punktach pomiarowych, żaden z wysłanych pakietów nie dotarł do koordynatora.

Podsumowując pomiar przepustowości w warunkach przemysłowych, do około 80 metra można spodziewać się utraty około 50 bitów na sekundę w przypadku zastosowania modułu 433 MHz. Za tym punktem przepustowość drastycznie opada i osiąga minimalną wartość 20 b/s przy 100 metrze, gdzie dla 868 MHz na 100 m przepustowość to 380 b/s.

Drugie środowisko badawcze to budynek cywilny. Koordynator został umieszczony w jednym z pomieszczeń, następnie zmieniano położenie nadajnika. Grubość pojedynczej ściany oddzielającej pomieszczenia wynosiła 180 mm, natomiast materiał ścian to beton. Średnia odległość między punktami pomiarowymi wyniosła 4 metry. Jako że w technice biurowej wymiany informacji bardziej istotnym czynnikiem jest efektywność, badania skupiły się głównie na tym parametrze. Co więcej, wyznaczono charakterystykę parametru RSSI, który jest pomocny przy filtrowaniu odebranych sygnałów w zależności od tego właśnie parametru. Filtrowanie takie stosuje się w przypadku dużego natężenia ruchu danych na niewielkim obszarze.



**Rys. 7. Charakterystyka efektywności w funkcji ilości ścian – antena PCB 868MHz**

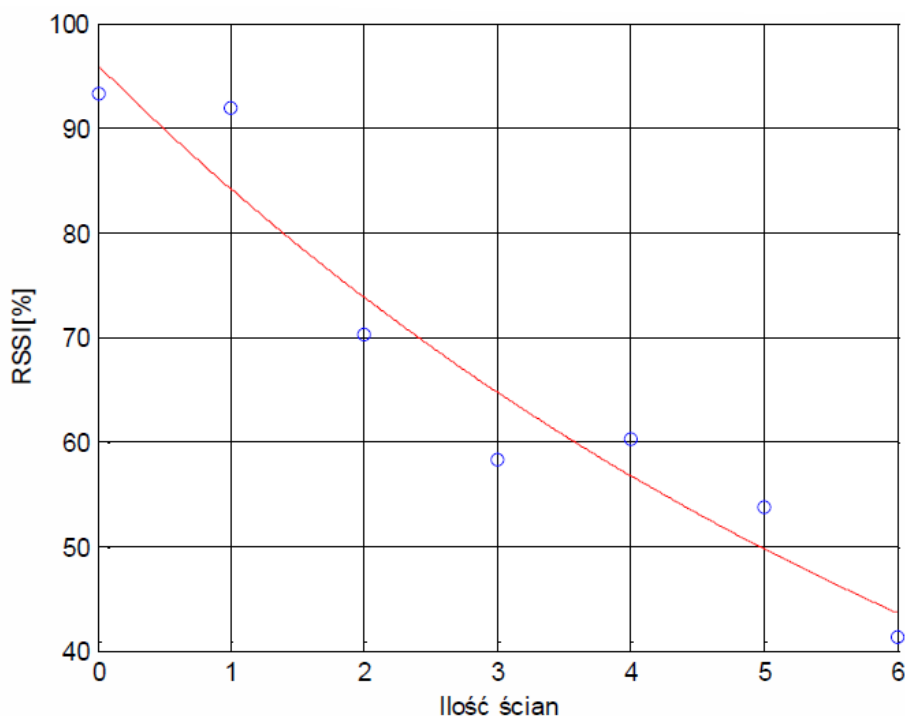
Rysunek 7 przedstawia charakterystykę efektywności w funkcji ilości ścian (pomieszczeń) dla anteny PCB 868 MHz. Kolorem czerwonym oznaczono aproksymację wykładniczą, na podstawie której można określić efektywność w sześciu kolejnych punktach pomiarowych:

$$E = 99,4e^{(3 \cdot 10^{-3} \cdot x)} - 0,088e^{1,09 \cdot x} \wedge x \in (1, 2, 3, \dots, 6) \quad (5)$$

Charakterystyka obrazuje efektywność transmisji radiowej w przypadku rozmieszczenia modułów w zamkniętych pomieszczeniach. Według niej, do 5 pomieszczeń (rozmieszczonych według wytycznych środowiska badawczego) efektywność stoi na wysokim poziomie. W siódmym pomieszczeniu, efektywność wyniosła 0%.

Badania te dają podstawę i możliwości do modelowania sieci biurowej bądź cywilnej. Pomocnym parametrem przy modelowaniu okazuje się być RSSI, służące jako wskaźnik mocy połączenia.





**Rys. 8. Charakterystyka RSSI w funkcji ilości ścian – antena PCB 868MHz**

Rysunek 8 przedstawia charakterystykę RSSI w funkcji ilości ścian. Model matematyczny, na podstawie którego określono RSSI w poszczególnych punktach to:

$$RSSI = 96e^{-0,13*x} \wedge x \in (1,2,3, \dots, 6) \quad (6)$$

Należy nadmienić, że badania te prowadzone były dla jednego nadajnika i odbiornika. W celu rozszerzenia sieci, istnieje możliwość rozmieszczenia modułów radiowych na większym obszarze. Posiadając modele efektywności i RSSI, projektant sieci jest w stanie modelować przykładową sieć. Aby połączyć wszystkie moduły w integralną całość, należy skorzystać z jednego z algorytmów routingu danych. Przykładem jest np. algorytm IQMESH DISCOVERY, gdzie występuje jeden koordynator i wiele nadajników. Metoda ta polega na przekazywaniu danych z nadajników będących poza zasięgiem koordynatora, poprzez inne nadajniki znajdujące się w pobliżu. W ten sposób powstają tzw. ścieżki routowania danych.

## 6. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono modele matematyczne wybranych parametrów transmisji radiowej, mające znaczenie pod względem modelowania systemów radiowych dla celów cywilnych bądź przemysłowych. Modele te obejmują efektywność transmisji, przepustowość transmisji oraz RSSI (Received Signal Strength Indication). Posłużyły one między innymi do stworzenia prototypowego bezprzewodowego systemu monitoringu temperatury przedstawionego w rozdziale 3. Poza wysoką wydajnością, cechuje się on przede wszystkim modułową budową. Główną zaletą stosowania modułów radiowych w wymianie danych jest łatwość rozszerzania struktury sieci na duże obszary. Jak udowodniono poprzez wyniki badań w rozdziale 5, pojedynczy nadajnik jest w stanie przesłać dane do koordynatora z odległości 120 metrów (w warunkach przemysłowych, gdzie występują zakłócenia spowodowane między innymi polem magnetycznym). Daje to możliwości tworzenia rozległych sieci przy

niewielkich nakładach finansowych. W artykule przedstawiono również inne przykładowe aplikacje, w których sprawdzić się mogą opisane moduły radiowe.

Podsumowując, komunikacja radiowa jest wydajnym i efektywnym sposobem wymiany danych. Korzyści, jakie ze sobą niesie, umożliwiły prace nad rozwijaniem prototypowego systemu. Obecnie prowadzone są prace nad implementacją algorytmu IQMESH DISCOVERY, umożliwiającego adaptacyjne dopasowanie modułów do zmiany struktury sieci i wyznaczanie ścieżki przekierowywania danych w sposób „inteligentny”.

## 7. LITERATURA

- [1] Pengfei L., Jiakun L., Junfeng J.: „Wireless temperature monitoring system Based on the ZigBee technology”. 2010 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology, Volume 1, p.160-163.
- [2] Singh Rajesh, Shailesh Mishra.: „Temperature Monitoring in Wireless SensorNetwork using Zigbee Transceiver Module”. Power, Control and Embedded Systems (ICPCES), 2010 In-ternational Conference on, p.1-4.
- [3] Petra Seflova, Vladimir Sulc, Jiri Pos, Rostislav Spinar.: „IQRF Wireless Technology Utilizing IQMESH Protocol”. Telecommunications and Signal Processing (TSP), 2012 35th In-ternational Conference, p.101-104.
- [4] Maxim Dallas DS18B20 datasheet, <http://www.maximintegrated.com>, [dostęp: 20.07.2014].
- [5] IQRF web page, [www.iqrf.org](http://www.iqrf.org). [dostęp: 20.07.2014].
- [6] Kuchta R., Vrba R., Sulc V.: „IQRF Smart Wireless Platform for Home Automation: A Case Study”. Wireless and Mobile Communications, 2009. ICWMC '09. Fifth International Conference on, p. 168 – 173.

## MATHEMATICAL MODELS OF SELECTED PARAMETERS OF RADIO TRANSMISSION BASED ON IQRF MODULES

**Abstract.** The paper presents a prototype of a wireless data exchange system based on IQRF radio modules illustrated with the example of temperature measurement, and tests related to the efficiency of the system operating in an industrial or civilian environment. The paper consists of two parts: practical and research. The practical part describes the operating principles of the designed system, the components used and the measurement procedures. The research part includes mathematical models and characteristics of selected parameters of radio transmission (efficiency, capacity) under varied environmental conditions. Testing of the capacity, which was adopted as an indicator of transmission quality, was conducted under industrial conditions (a 120-m long corridor with operating industrial equipment nearby). Transmission efficiency (ratio of packets received to packets sent expressed as percentage) was tested in a civilian environment (office building). Of particular significance are the efficiency tests conducted in the office building with a large number of rooms separated by walls. Results of these tests enable modelling of data exchange networks by means of the obtained mathematical models and using the IQMESH Discovery routing algorithm described in the paper. The tests conducted in the industrial environment were performed with three different versions of the module: 868 MHz PCB antenna, 868 MHz external antenna and 433 MHz external antenna.

**Keywords:** IQRF, radio transmission, RF data exchange, radio transmission parameter models.