

BADANIA SYMULACYJNE BEZPRZEWODOWEGO SYSTEMU EKSPERYMENTALNEGO OPARTEGO NA STANDARDZIE ZIGBEE PRZY WYKORZYSTANIU ŚRODOWISKA OPNET MODELER

SIMULATIONS OF EKSPERIMENTAL SET UP BASED ON ZIGBEE STANDARD USING OPNET

Beata Krupanek, *Politechnika Śląska w Gliwicach*

Abstract

OPNET Modeler is industry solution for modelling and simulation of communications networks, devices, and protocols. It is object-oriented modeling approach and graphical editors mirror the structure of actual networks and network components. OPNET Modeler supports many network types and technologies. OPNET Modeler is based on a series of hierarchically related editors that directly parallel the structure of actual networks. The modeling structure is shown on figure 2. The OPNET were used to simulate an experimental measurement system based on ZigBee technology.

ZigBee is a specification for a suite of high level communication protocols using small, low-power digital radios based on the IEEE 802.15.4 standard for wireless personal area networks. Standard also defines the physical, MAC, network and application layers. ZigBee is targeted at radio-frequency applications that require a low data rate, long battery life, and secure networking.

The measurement system is based on three different types of ZigBee devices such as: Coordinators, Router and a desired number of End Devices. These devices can be joined in one of three network technology: mesh, tree or star. Different topology give benefits depending on used application.

Executed simulations shows delays and number of send and received bits per second in measurement system. For better comparison system were examined on different conditions including power of transmitters and ACK system and two topologies. One network contains router and two coordinators and the second one only the coordinator.

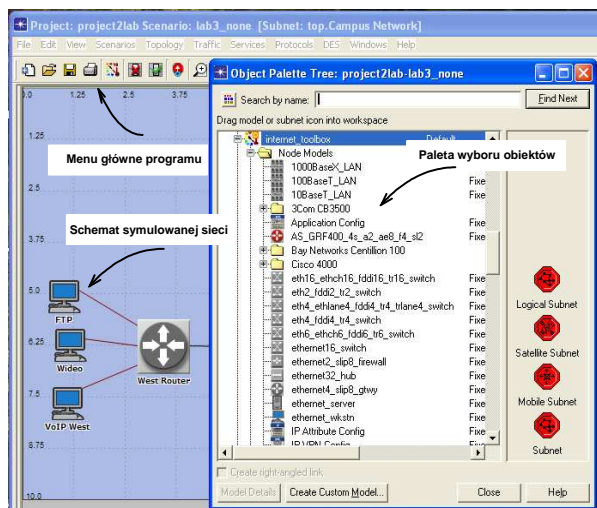
Streszczenie

Publikacja ma na celu pokazanie możliwości środowiska OPNET Modeler, a także sposobu prowadzenia symulacji wybranych konfiguracji sieciowych. Następnie opisana zostanie technologia ZigBee w odniesieniu do symulowanego systemu pomiarowego. W pracy przedstawiono sposób prowadzenia symulacji oraz wyniki badań prowadzonych przy użyciu wspomnianego programu. Wykonane badania dotyczą systemu eksperymentalnego przeznaczonego do analizy zakłóceń transmisji bezprzewodowej. System bazuje na wykorzystaniu protokołu IEEE 802.15.4 czyli ZigBee. W badaniach symulacyjnych skupiono się na porównaniu systemów opartych o różne typy urządzeń w różnych konfiguracjach..

1. Środowisko OPNET Modeler

Oprogramowanie OPNET stworzone przez firmę OPNET Technologies Inc. jest wirtualnym środowiskiem, umożliwiającym specjalistom zasymulowanie pracy każdej infrastruktury sieciowej jako całości, włącznie z technologiami, protokołami i konkretnymi urządzeniami oraz aplikacjami używanymi przez końcowych użytkowników.

Głównym elementem środowiska jest pakiet OPNET Modeler, w którym symulacje polegają na odwzorowaniu i uruchomieniu sieci za pomocą interfejsu graficznego umożliwiającego tworzenie modeli, zbieranie danych i ich późniejsze przetwarzanie. Program ma wbudowane biblioteki modeli zawierających większość używanych obecnie protokołów i aplikacji TCP/IP, a także modele różnego typu połączeń używanych obecnie do łączenia węzłów w sieci.



Rys.1. Okno projektu programu OPNET Modeler.

Fig.1. Projekt window in OPNET Modeler.

Środowisko OPNET uwzględnia relacje pomiędzy poszczególnymi elementami sieci i dostarcza wielu informacji niezbędnych do oceny wydajności działania zainstalowanych aplikacji i pracy sieci jako całości. Dzięki tym informacjom możliwe jest planowanie całych systemów informacyjnych, ich konfiguracja, rozbudowa i diagnostyka, a przede wszystkim budowa zoptymalizowanych, pod kątem kosztów i jakości, sieci pomiarowych i komputerowych. Oprogramowanie OPNET Modeler pozwala również na planowanie wdrożenia aplikacji w sieci, analizę poprawności konfiguracji sieci a także scentralizowane zarządzanie danymi pochodzącymi z różnych źródeł oraz planowanie migracji istniejącej struktury do nowych technologii sieciowych [2].

Modelowanie w środowisku OPNET Modeler odbywa się na trzech hierarchicznych poziomach. Najwyższy z nich to poziom sieci i najczęściej używany, pozwala na połączenie węzłów sieciowych takich jak przełączniki, wzmacniacze i routery za pomocą odpowiednich łączy komunikacyjnych.

Na tym poziomie należy ustalić wymiary obszaru roboczego oraz określić biblioteki, które będą używane podczas tworzenia schematu sieci. Następnie na powstałej planszy umieszczane są elementy sieci, po czym użytkownik może połączyć je wybranym łączem transmisyjnym według zadanego schematu.

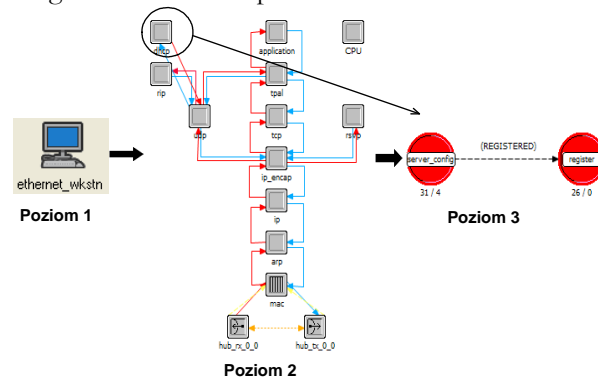
Po zbudowaniu systemu konieczne jest określenie parametrów globalnych całej sieci i lokalnych wybranych węzłów, które mają być przetwarzane i zapisywane podczas symulacji. Do wyboru użytkownika jest szereg różnych parametrów podzielonych protokołami i usługami tj.: opóźnienie pakietów, ilość pakietów otrzymanych i utraconych, jitter oraz wiele innych.

Kolejnym krokiem jest wybór właściwości samej symulacji np. czasu trwania symulacji i jej końcowe przeprowadzenie. Otrzymane rezultaty są widoczne w oddzielnym oknie programu. Istnieje możliwość

otrzymania wykresu wybranego parametru w funkcji czasu a także eksport danych do pliku.

Każdą sieć można wielokrotnie modyfikować a także zmieniać symulowane parametry, przy czym OPNET umożliwia zapis każdego scenariusza a następnie jednoczesne symulowanie i porównywanie uzyskanych wyników z wszystkich dostępnych scenariuszy.

Niższy poziom w hierarchii to poziom węzła, na którym można zmieniać wewnętrzną strukturę utworzonej sieci za pomocą obiektów poziomu węzła tj. nadawcy, odbiorcy, kolejki oraz zestawu protokołów. Poziom procesu jest najniższym poziomem charakteryzującym się bardzo dużą szczegółowością. Z trzeciego poziomu można samodzielnie edytować parametry urządzenia sieciowego posługując się językiem C++. Taki podział pozwala na uproszczenie procesu tworzenia symulacji, ponieważ zmienia się jedynie funkcje wybranej warstwy [2]. Rysunek 2 przedstawia wygląd stacji końcowej roboczej na poziomie pierwszym i drugim środowiska Opnet Modeler.



Rys.2. Stacja robocza w programie OPNET Modeler.

Fig.2. Workstation in OPNET Modeler.

Za pomocą Modelera można zdefiniować również dowolny, autorski protokół wybranej warstwy modelu OSI oraz opisać jego parametry i działanie. Modeler zawiera również szereg wbudowanych funkcji statystycznych pozwalających na szybką analizę wykonanej symulacji i jej bezpośrednią prezentację na ekranie.

2. Współczesne systemy pomiarowe

Obserwowany na przestrzeni ostatnich lat rozwój systemów komputerowych oraz technologii transmisji danych sprawił, że współczesne układy sterowania przestają występować jako samodzielne jednostki. Powszechne zastosowanie zyskały rozproszone systemy pomiarowo-sterujące, których elementy mogą być fizycznie rozdzielone i zachowywać samodzielność w podejmowaniu decyzji.

Umożliwia to taki podział zadań między poszczególne elementy systemu, który optymalizuje dostęp do zasobów oraz uzyskiwaną wydajność.

Istotnym parametrem systemów rozproszonych jest technologia wykorzystywana do wymiany informacji między elementami [1]. Przemysł oraz branża kontrolno - pomiarowa nakłada tu dodatkowe ograniczenia ze względu na oczekiwaną niezawodność czy niepodzielność danych, a także bezpieczeństwo transmisji. Ewolucja w tym obszarze prowadziła od technologii przewodowych, przez systemy bezprzewodowe o ustalonej topologii sieciowej, po rozwijane obecnie systemy bezprzewodowe typu ad-hoc posiadające pewne zdolności do samoorganizacji.

Jednym z impulsów powodujących wzrost zainteresowania rozwiązaniami bezprzewodowymi w transmisji danych jest rozwój elastycznych systemów produkcyjnych. Istnieje możliwość szybkiej rekonfiguracji, np. linii produkcyjnej. Dodatkowo systemy bezprzewodowe, dzięki eliminacji kabli, są wyraźnie tańsze: zarówno w instalacji jak i w utrzymaniu.

Pomimo wielu zalet, systemy bezprzewodowe nie są pozbawione wad, do których można zaliczyć większe opóźnienia (czas dostępu do węzła) czy zwiększone prawdopodobieństwo utraty danych (zakłócenia od innych systemów pracujących w paśmie, wielotorowość, praca na granicy zasięgu) [1]. Trzeba zaznaczyć, że wady te mogą zostać skompensowane poprzez właściwy dobór technologii transmisji danych czy odpowiednie zaprojektowanie systemu.

W niniejszej pracy przetestowano transmisję w jednym z najnowszych i coraz częściej stosowanych standardów bezprzewodowych – ZigBee.

2.1 Transmisja w standardzie ZigBee

Standard IEEE 802.15.4 (warstwa fizyczna i warstwa MAC) i uzupełniająca go specyfikacja ZigBee (rozwijana przez stowarzyszenie największych firm z branży elektronicznej, definiuje warstwę sieci oraz aplikacji, w tym bezpieczeństwa transmisji) stanowi odpowiedź na wymagania stawiane przez bezprzewodowe systemy rozproszone, w szczególności projektowane do zastosowań na gruncie czujników pomiarowych i kontrolerów.

Standard i specyfikacja ZigBee opisują model komunikacji zorganizowanej warstwowo oraz zasady tworzenia programów użytkownika, które mają umożliwić zbudowanie sieci bezprzewodowej małego zasięgu przeznaczoną do transmisji o niskich prędkościach. Urządzenia wykorzystujące standard IEEE 802.15.4 charakteryzują się przede wszystkim łatwym nawiązywaniem połączenia z istniejącą siecią, niskim zużyciem energii oraz odpornością na wpływ urządzeń działających w innych systemach bezprzewodowych. Są zaprojektowane do pracy w warunkach przemysłowych przy dużych zakłóceniach. Urządzenia bezprzewodowe małego

zasięgu znajdują zastosowanie także w tzw. „inteligentnych domach”, gdzie kontrolują oświetlenie, ogrzewanie, czujniki, alarmy itp. Dokument IEEE 802.15.4 stanowi szczegółowy opis warstwy fizycznej PHY (ang. Physical Layer) oraz warstwy dostępu do medium transmisyjnego MAC (ang. Medium Access Control) dla sieci bezprzewodowych małego zasięgu i małych prędkości transmisji. Standard zakłada użycie dostępu do medium typu CSMA-CA (ang. Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance) co oznacza wielodostęp z detekcją fali nośnej oraz zapobieganiem kolizjom transmisji. Umożliwia on budowę sieci o konfiguracji gwiazdowej jak również P2P (ang. peer-to-peer – równy z równym), pozwalająca na komunikację dwóch urządzeń końcowych bez pośrednictwa urządzenia nadzorującego.

Specyfikacja interfejsu radiowego ZigBee zakłada wykorzystanie jednego z kilku pasm częstotliwościowych, najpopularniejsze zastosowanie obejmuje 16 kanałów o szerokości 3 MHz w paśmie ISM 2,4 GHz. Zig- Bee wykorzystuje modulację O-QPSK z rozpraszaniem widma sekwencją bezpośrednią. Maksymalna przepływność transmisji wynosi 250 Kbit/s, co wystarcza do większości zadań pomiarowych. Mechanizm transmisji danych zależy od rodzaju sieci – możliwy jest swobodny dostęp do kanału CSMA/CA lub też stosowanie struktury szczelinowej kontrolowanej przez urządzenie koordynujące [1].

Sieć może składać się z jednego koordynatora (ang. Coordinator), jednego lub więcej urządzeń końcowych (ang. End Device) oraz opcjonalnie jednego lub więcej ruterów (urządzeń segmentujących sieć).

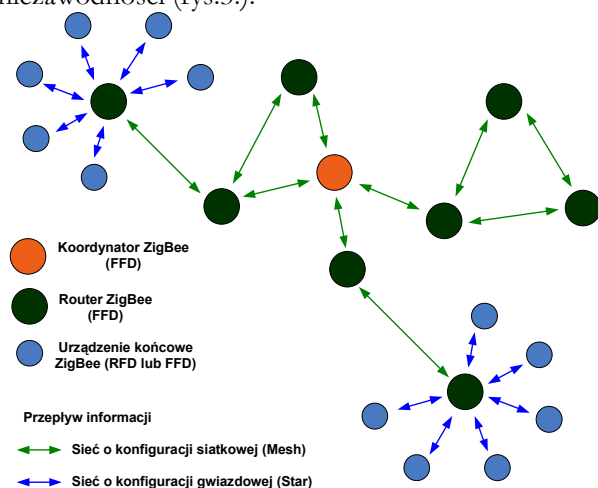
Koordinator to urządzenie o tzw. pełnej funkcjonalności - FFD (ang. Full Function Device). Może ono pełnić rolę któregośkolwiek elementu sieci (koordynatora, rutera, urządzenia końcowego) [3]. Do zadań koordynatora należy utworzenie nowej sieci, synchronizowanie jej przez cykliczne wysyłanie ramek synchronizacyjnych, podejmowanie decyzji o podłączeniu nowych urządzeń do sieci oraz przechowywanie tablicy adresów urządzeń aktualnie podłączonych (rys. 3).

Istotną właściwością technologii ZigBee jest to, że urządzenia mogą pracować w sieciach o różnych konfiguracjach. Standard ten definiuje trzy rodzaje konfiguracji sieci:

- sieć o konfiguracji gwiazdy (ang. Star Topology), która zapewnia bardzo długą żywotność baterii, a urządzenie FFD pełniące rolę koordynatora sieci jest położone w centrum sieci i każda informacja przesyłana jest poprzez niego.
- sieć o konfiguracji siatkowej (ang. Mesh Topology) zapewniająca wysoką jakość oraz niezawodność komunikacji pod warunkiem, że

przewodzony sygnał do wybranych węzłów odbywa się poprzez więcej niż jedną ścieżkę, czyli zawiera połączenia nadmiarowe. Zdolność ta czyni konfigurację siatkową najbardziej optymalną do zastosowań na dużych powierzchniach [3].

- sieć o konfiguracji drzewiastej (ang. Tree Topology) wykorzystuje połączenie konfiguracji gwiazdy z konfiguracją siatkową dając użytkownikom korzyści wynikające z właściwości dwóch wcześniejszych topologii, czyli pomoc węzłom zasilanym bateryjnie oraz większy poziom niezawodności (rys.3.).



Rys.3. przykład sieci w standardzie ZigBee.

Fig.3. Example of ZigBee network.

W zależności od używanej topologii sieci, standard ZigBee przewiduje dwa sposoby dostępu do kanału transmisyjnego. W sieci z wyróżnionym urządzeniem koordynującym używany jest mechanizm szczelinowego CSMA – CA (ang. slotted CSMA – CA); natomiast w pozostałych warunkach używany jest mechanizm zwykłego CSMA –CA. Metoda CSMA - CA (ang. Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) jest metodą wielodostępu z wykrywaniem nośnika i unikaniem kolizji.

W technologii ZigBee występują trzy charakterystyczne tryby adresowania: okresowe z okresem ustalonym przez użytkownika, nieregularne stosowane do urządzeń sterowanych nieregularnie oraz adresowanie powtarzalne z krótkim czasem oczekiwania związane z przydziałem szczeliny czasowej [3].

Standard IDEE 802.15.4 pozwala na trzy różne typy transakcji danych. Są to:

- transmisja z urządzenia do koordynatora,
- transmisja z koordynatora sieci do urządzenia,
- transmisja z urządzenia do innego urządzenia.

W sieci o konfiguracji gwiazdowej występują tylko dwa pierwsze typy transmisji danych. Możliwość retransmisji danych zależy od tego czy koordynator sieci wysyła sygnał sygnalizacyjny "beacon" czy też nie. W sieci o topologii siatkowej możliwe są wszystkie trzy typy transakcji.

W typie przesyłu danych od urządzenia do koordynatora, urządzenie nasłuchuje sygnału sygnalizacyjnego. Gdy urządzenie wykryje ten sygnał, synchronizuje on strukturę ramki. Proces ten pozwala mu określić początek i koniec okresu transmisji. Urządzenie rywalizuje z innymi urządzeniami o dostęp do kanału transmisyjnego. Na jego otrzymanie transmitowane są dane do koordynatora sieci. Koordynator sieci może przesłać sygnał potwierdzający poprawny odbiór, jeśli nie jest to opcjonalna funkcja.

W momencie, gdy koordynator sieci posiada dane, które chce wysłać do urządzenia wskazuje na to sygnał sygnalizacyjny w polu adresu. Urządzenie po otrzymaniu sygnału sygnalizacyjnego, dekoduje pola adresowe, aby móc stwierdzić, że jest ono adresatem danych. Jeśli urządzenie stwierdzi swój adres umieszczony na liście pól adresów oczekujących, wysyła na żądanie dane do koordynatora (ramka informacyjna), który w odpowiedzi wysyła sygnał potwierdzenia ACK. Następnie koordynator wysyła dane do urządzenia. Jeśli sygnał potwierdzenia nie jest opcjonalny, to koordynator odpowiada właśnie tym sygnałem

Typ transmisji pomiędzy dwoma urządzeniami wykorzystywany jest w sieciach o konfiguracji siatkowej. Każde urządzenie może transmitować dane do drugiego urządzenia, które znajduje się w jego zasięgu. Transmisja między dwoma urządzeniami może być zrealizowana przy wykorzystaniu dwóch różnych technik. W pierwszej metodzie transmisji danych urządzenia są wspólnie zsynchronizowane. Natomiast druga metoda transmisji opiera się na wykorzystaniu bezszczelinowego mechanizmu CSMA – CA.

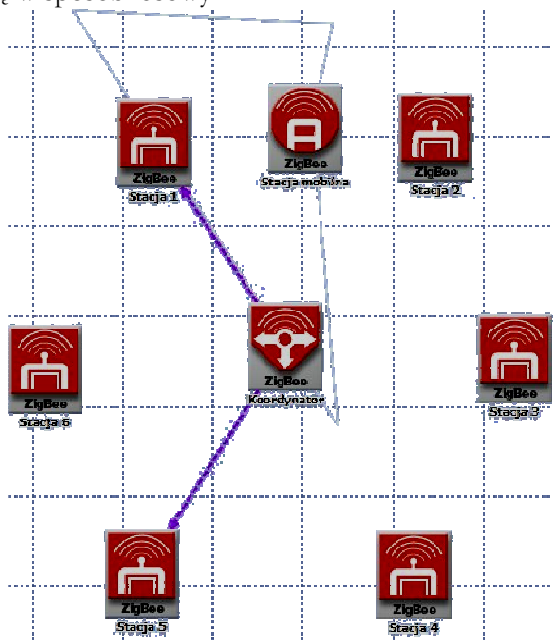
Bardzo istotną cechą standardu IEEE 802.15.4 jest małe zużycie energii pozwalające na budowę autonomicznych, zasilanych przez baterie urządzeń nadawczo- odbiorczych. Ta cecha czyni ZigBee niezwykle przydatnym dla różnorodnych aplikacji.

Mały pobór energii przekłada się na tanią infrastrukturę, mobilność urządzeń czy skalowalność. Największe zużycie energii typowego urządzenia nadawczo-odbiorczego ma miejsce podczas przesyłania informacji - dzięki zastosowaniu krótkiego czasu transmisji ramek oraz długiego okresu pomiędzy kolejnymi cyklami przesyłania danych możliwa jest minimalizacja zużycia energii. Dodatkowo standard zakłada wykorzystanie jednego z kilku trybów uśpienia w chwilach bezczynności.

3. Symulacje systemu eksperymentalnego

W środowisku OPNET Modeler został utworzony model symulacyjny systemu eksperymentalnego w dwóch konfiguracjach: prostej i zaawansowanej. Oba systemy zostały rozproszone na obszarze 1 km².

Pierwszy model zawiera koordynator umieszczony w centralnym punkcie sieci oraz sześć nieruchomych stacji roboczych (rys.4.). W sieci znajduje się również jedna stacja mobilna z wytyczoną trajektorią ruchu po zadeklarowanym obszarze. Sieć pracuje w konfiguracji gwiazdowej (zaznaczono przykładową transmisję z koordynatora do Stacji 1 i 5), przy czym nieużywane są sygnały potwierdzenia ACK przy transmisji z urządzenia końcowego do koordynatora ani pomiędzy dwoma stacjami końcowymi. W układzie węzły komunikują się w sposób losowy.

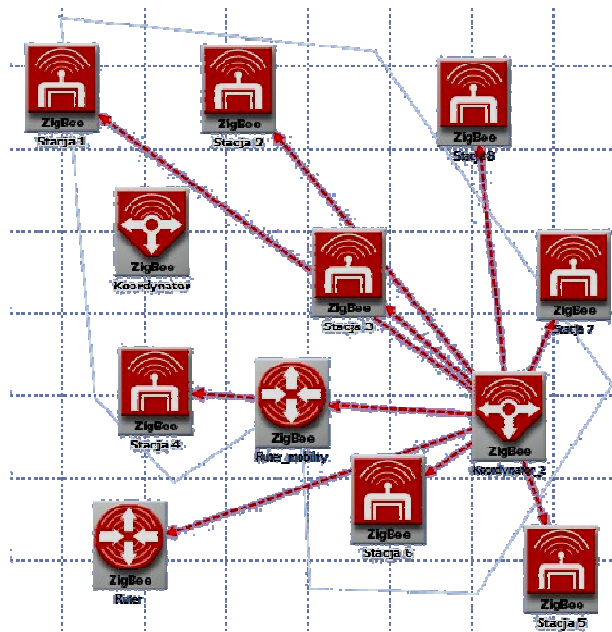


Rys.4. Schemat pierwszego układu symulacyjnego.
Fig.4. First simulation set up.

W zbudowanym układzie wybrano statystyki lokalne (dla każdego z węzłów) i parametry globalne sieci, które mają być rejestrowane w trakcie trwania symulacji. Czas symulacji ustalono na 1 godzinę.

Zaawansowany układ symulacyjny (rys.5) powstał poprzez rozbudowę wcześniejszego schematu. Zawiera on osiem stacjonarnych węzłów końcowych rozproszonych po identycznym, jak wcześniej, terenie. Ponieważ urządzenia typu RFD (o ograniczonej funkcjonalności) mogą pracować tylko w topologii gwiazdy, gdzie komunikują się z koordynatorem układ został wyposażony w dwa koordynatory oraz dwa routery – jeden stacjonarny natomiast drugi mobilny z wyznaczoną trajektorią po obrzeżu całej sieci. Opierając się na dwóch podstawowych topologiach sieci możliwe stało się zdefiniowanie dowolnych zależności połączeń. Co decyduje o prostej implementacji sieci i zmniejszeniu zużycia energii.

W zbudowanym systemie pomiarowym wybrano identyczne dane do zapisu jak wcześniejszym układzie. OPNET Modeler umożliwia jednoczesną symulację kilku różnych scenariuszy i jednoczesną rejestrację wybranych statystyk a następnie ich dowolne porównywanie.



Rys.5. Zaawansowany układu symulacyjny.
Fig.5. Second simulation set up.

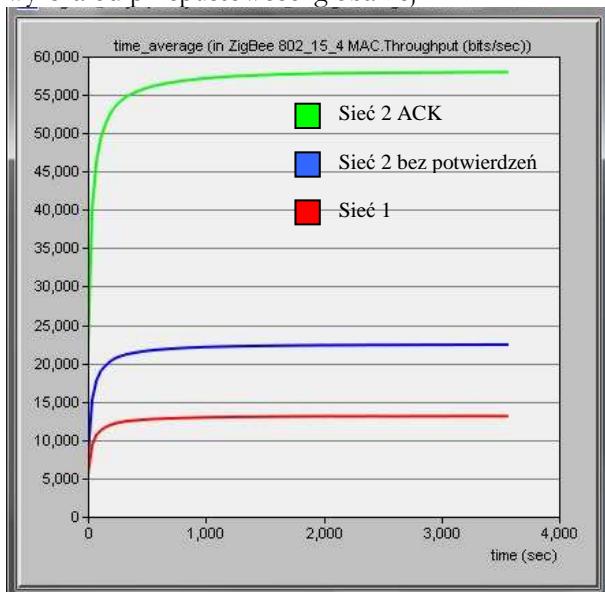
System pokazany na rysunku 5 oprócz zmienionej struktury została również wzbogacony o funkcję przesyłania potwierdzeń - ACK. W trakcie badań założono również, że nie wszystkie węzły komunikują się w sposób losowy z przypadkowo wybranym innym urządzeniem w sieci. Stacja 1 nadaje dane jedynie do stacji nr 5, stacja nr 8 może komunikować się jedynie z koordynatorem 2. Ruter mobilny może komunikować się z wszystkimi urządzeniami w sieci natomiast ruter nieruchomy jedynie z stacjami końcowymi i koordynatorem 2.

W stosunku do pierwszego układu zmniejszono również moc nadajników i odbiorników poszczególnych stacji roboczych, ponieważ dzięki zastosowaniu większej liczby urządzeń koordynujących nie jest konieczne tak duże zużycie energii.

Do najważniejszych parametrów, które podlegają akwizycji w trakcie wykonywania symulacji należą: średnie opóźnienie pakietów na drodze od jednego węzła do drugiego, opóźnienie globalne w sieci, przepustowość zarówno średnia w sieci jak również pomiędzy wybranymi stacjami końcowymi a także ilość pakietów wysyłanych i odbieranych przez kolejne węzły.

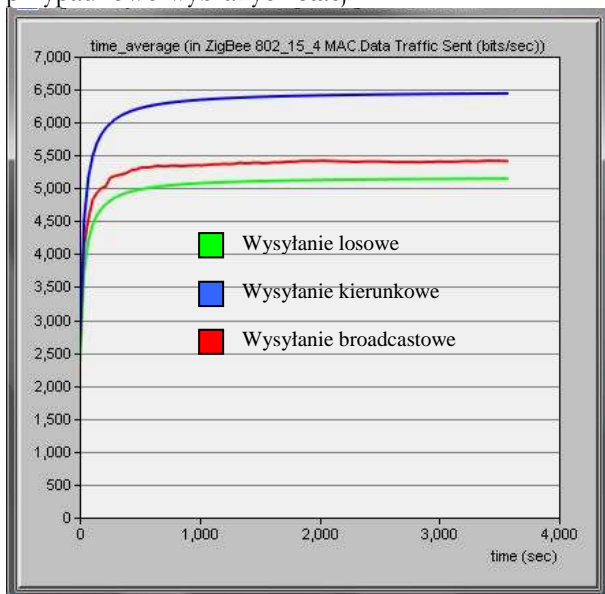
Przepustowość sieci prostej i zaawansowanej została porównana na rysunku nr 6. Symulacja była prowadzona przez godzinę, natomiast na wykresie uwzględniono przepustowość prostej sieci, bez potwierdzeń, sieci zaawansowanej bez potwierdzeń oraz sieci zaawansowanej przy zastosowaniu systemu potwierdzeń ACK. Wyraźnie widać, że największą przepustowość ma rozbudowana sieć z systemem potwierdzeń ACK. Natomiast niższą ma ta sama sieć jednak bez zastosowanego mechanizmu potwierdzeń. Również przepustowość samego

koordynatora czy innego węzła w sieci jest znacznie wyższa od przepustowości globalnej.



Rys.6. Przepustowość sieci 1i 2 w standardzie ZigBee
Fig.6. Thruput of ZigBee networks 1 and 2

Na rysunku 7 pokazano trzy charakterystyki obrazujące ruch wysyłany z węzła sieci (ang. traffic sent) w bitach na sekundę, przy czym symulacja była prowadzona w zaawansowanym układzie symulacyjnym i uwzględnia różne możliwości wysyłania danych – kierunkowe (do jednego wybranego węzła w sieci), rozsyłanie broadcastowe (czyli do wszystkich węzłów) i losowe do przypadkowo wybranych stacji.



Rys.7. Ruch wysyłany przez węzeł sieci 2
Fig.7. Traffic sent by node in network 2

W trakcie symulacji okazało się, że opóźnienie, jakiego doświadczają pakiety przesyłane w sieci jest rzędu 0.04 sekundy przy czym zwiększa się ono gdy wymagane są potwierdzenia transmisji.

Ważna jest również ilość utraconych pakietów, co wpływa na wierność i pewność transmisji. W prostej sieci to średnio 180 pakietów natomiast w sieci

rozbudowanej gdzie istnieje dodatkowo możliwość wysyłania danych do urządzeń mobilnych typu FFD, nawet bez zapewniania poprawności transmisji mechanizmem ACK ilość traconych pakietów spada do średnio 110 w trakcie trwania symulacji.

4.Podsumowanie

Przeprowadzono symulacje dwóch różnych sieci opartych na standardzie ZigBee. Daje on możliwość ze względu na parametry radiowe jak i założenia pozwalające na redukcję mocy pobieranej przez urządzenia, wykorzystania w bezprzewodowych sieciach czujnikowych. Urządzenia wykorzystane do budowy sieci mają niewielkie rozmiary i nie pobierają dużych ilości energii.

Uzyskane wyniki pokazują ponadto, że poprzez prostą zmianę konfiguracji sieci lub jej parametrów (zmniejszenie zasięgu nadajników, włączenie lub wyłączenie mechanizmu ACK) można odpowiednio dobrać zadowalającą wielkość opóźnienia transmisji jak również przepustowość i inne wielkości.

5.Literatura i dane autorów

1. Olszyna Jakub: *Technologie bezprzewodowe w przemyśle na przykładzie standardu ZigBee*, PAR 12/2008.
2. Krupanek Beata, Topór-Kamiński Tadeusz: *Niezawodność przesyłu danych w rozproszonych systemach pomiarowych*, Konferencja PPM 2009, Sucha Beskidzka.
3. Van Nieuwenhuysse Anneleen: *On the use of the ZigBee protocol for Wireless Sensor Networks*, technical report.
4. Taehong Kim: *Shortcut Tree Routing in ZigBee Networks*, Information and Communications University, Electronics and Telecommunications Research Institute.



Adres służbowy:

Mgr inż. Beata Krupanek
Politechnika Śląska
ul. Akademicka 10
44-100 Gliwice
tel. (032) 123 45 67
fax (032) 123 45 67