

SIECI BEZPRZEWODOWE DLA SYSTEMÓW ZDALNYCH POMIARÓW

Autorzy: Zygmunt Kubiak, Andrzej Urbaniak

(„Rynek Energii” – nr 4/2010)

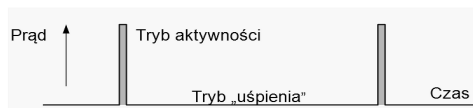
Słowa kluczowe: inteligentne pomiary, bezprzewodowe sieci pomiarowe, protokoły pomiarowe

Streszczenie. W pracy dokonano przeglądu rozwiązań w zakresie transmisji danych w bezprzewodowych sieciach pomiarowych. Omówiono wymagania stawiane tego typu rozwiązaniom zarówno pod względem sposobu transmisji jak i jej jakości. Scharakteryzowano tryby pracy węzłów sieci pełniących różne funkcje pomiarowe, transmisyjne nadawczo-odbiorcze i koordynujące oraz pracujące w charakterze koncentratorów danych czy routerów. Zwrócono uwagę na szczególne wymagania w zakresie zasilania węzłów sieci wskazując rozwiązania energooszczędne pozwalające na pracę węzłów sieci pomiarów bez konieczności wymiany baterii zasilających w długim okresie czasu. Efekt oszczędności energii uzyskano na drodze zastosowania mikroprocesorów pracujących w trybie uśpienia z minimalnym zużyciem energii i wybudzanych do aktywności na krótki czas pomiaru i transmisji. Zamieszczono charakterystykę najczęściej stosowanych specjalizowanych protokołów transmisji danych w sieciach bezprzewodowych, zarówno tych najprostszych jak i bardziej złożonych. Na tej podstawie sformułowano wnioski w odniesieniu do możliwych zastosowań

1. WPROWADZENIE

Sieci bezprzewodowe coraz częściej są stosowane w systemach przemysłowych. Dzieje się tak za sprawą nowych rozwiązań w dziedzinie łączności radiowej. Współczesne technologie pozwalają na zdecydowane obniżenie kosztów węzła nadawczo-odbiorczego. Aktualnie dostępnych jest wiele rozwiązań przeznaczonych do transmisji dźwięku, wideo, realizacji sieci PC, telefonii mobilnej (jak WiFi, Bluetooth, GPRS), jednak do niedawna nie było standardów sieci bezprzewodowych dedykowanych układom i urządzeniom najniższego poziomu sterowania (na styku systemu sterującego z obiektem sterowanym), tzn. sensorom i układom wykonawczym. W tej dziedzinie dotychczas dominują sieci przewodowe, tzw. sieci miejscowe (ang. Fieldbus, np. Modbus, CAN). Sieci bezprzewodowe małej mocy nadawczej, o bardzo niskim poborze energii, realizowane na najnowszych rozwiązaniach monolitycznych układów radiowych nadawczo-odbiorczych, których węzły bezpośrednio współpracują z czujnikami różnych mierzalnych parametrów, noszą nazwę *Bezprzewodowych Sieci Sensorowych* (BSS, ang. WSN – *Wireless Sensor Networks*). Węzły końcowe takich sieci nazywane są często sensorami. Ocenia się, że sieci klasy WSN będą stopniowo wypierać okablowanie wejść/wyjść w systemach sterowania. Oczywiście zasięg stosowalności rozwiązań WSN nie ogranicza się tylko do technologii przemysłowych ale dotyczy właściwie wszystkich obszarów działalności człowieka, w tym zastosowań medycznych, wojskowych, rolnictwa, ochrony środowiska, inteligentnych budynków, gospodarstw domowych itp.

Sieci WSN stanowią idealne rozwiązanie dla systemów automatycznego odczytu urządzeń pomiarowych (AMR). W sieciach sensorowych istotne znaczenie ma pobór energii przez węzły. Węzły tych sieci mogą pracować nawet kilkanaście lat bez wymiany baterii, co jest szczególnie istotne przy pozyskiwaniu pomiarów np. z wodomierzy, gazomierzy czy ciepłomierzy. Wymaganie to częściowo jest realizowane na etapie konstrukcji węzła przez dobór elementów o niskim zapotrzebowaniu na energię oraz właściwy projekt (np. możliwość deaktywacji sensora gdy pomiar nie jest wykonywany). Wyżej wymienione zabiegi związane z budową i organizacją węzła są jednak niewystarczające dla osiągnięcia kilkuletniej pracy na jednym komplecie baterii. Dalszą energooszczędność można uzyskać przez zastosowanie protokołów wykorzystujących cykliczną aktywność węzłów [8,23]. Przez większość czasu cyklu węzeł pozostaje w stanie uśpienia (minimalny pobór) a wybudzany jest na czas wykonywania pomiarów, ewentualnego wstępnego przetwarzania wyników i czas transmisji (rys. 1).



Rys. 1. Praca węzła sieci WSN z zasilaniem bateryjnym

Całkowitą energię E pobieraną przez węzeł zasilany napięciem U_z można określić następująco [10]:

$$E = (I_m t_m + I_s t_s + I_t t_t + I_r t_r + \sum_i I_{e_i} t_{e_i}) U_z \quad (1)$$

gdzie: I_m, t_m – prąd i czas mikrokontrolera pracującego w stanie aktywnym, I_s, t_s – prąd i czas mikrokontrolera w stanie uśpienia, I_t, t_t – prąd i czas pracy nadajnika radiowego, I_r, t_r – prąd i czas pracy odbiornika radiowego, I_e, t_e – prądy i czasy aktywności pozostałych elementów węzła jak diody LED czy sensory.

We wzorze (1) wartości prądów są wartościami średnimi za rozważane okresy czasu. Ponadto nie uwzględniono stanów wyłączenia pozostałych elementów i układów poza mikroprocesorem. Można przyjąć, że prądy tych elementów dla stanów braku aktywności (np. prądy zerowe wyłączonych diod LED) zawierają się w wartości I_s .

W dalszej części artykułu omówiono przykłady sieci bezprzewodowych wybranych pod kątem zastosowań pomiarowych. Obejmują one zarówno protokoły o dużych możliwościach konfiguracyjnych i dużej uniwersalności, jak i sieci prostsze. Przedstawiono charakterystyczne cechy poszczególnych rozwiązań.

Do najważniejszych, dobrze zdefiniowanych protokołów należą IEEE 802.15.4 oraz ZigBee. Znaczenia nabiera opracowanie 6LoWPAN [19], stanowiące międzynarodowy otwarty standard, łączący protokół IEEE 802.15.4 z rozwiązaniami internetowymi. Specjalnie dla liczników mediów, dla potrzeb zdalnych odczytów, powstał natomiast standard Wireless M-BUS [24]. Interesującym rozwiązaniem jest prosty protokół EnOcean. Jego twórcy główny nacisk położyli na bezbaterijne rozwiązania węzłów sieci. Do wygenerowania energii elektrycznej, niezbędnej do bezprzewodowej transmisji pakietów danych wykorzystywane są różne zjawiska fizyczne. Przedstawiono również przykłady prostych protokołów (sieci SiWiNet, WMN) [10, 13] opracowanych w Instytucie Informatyki Politechniki Poznańskiej głównie dla celów dydaktycznych, które jednocześnie całkowicie spełniają wyżej określone wymagania i z powodzeniem mogą być stosowane w aplikacjach systemów AMR.

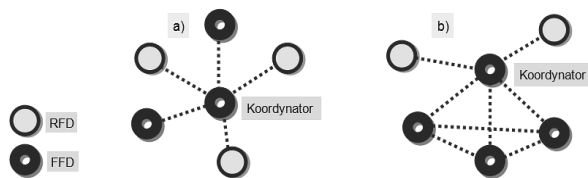
2. PROTOKOŁY IEEE 802.15.4/ZigBee

Szczególne znaczenie dla rozwoju sieci WSN miała standaryzacja w grupie tzw. sieci WPAN (ang. *Wireless Personal Area Networks*) a dokładniej opracowanie protokołów IEEE 802.15.4 dla sieci WPAN Low Rate. Standaryzacja nadała właściwy kierunek rozwojowi technologicznemu w dziedzinie radiowych sieci małej mocy. Prace normalizacyjne rozpoczęła grupa ZigBee Alliance w roku 1998 [27]. ZigBee Alliance jest stowarzyszeniem firm działających dla opracowania i rozwijania otwartego standardu dotyczącego transmisji bezprzewodowej małej prędkości i niskiej mocy, efektywnej pod względem kosztów. Zatwierdzony w roku 2003 standard IEEE 802.15.4 [9] (obecnie obowiązuje wersja z 2006 r.), opisuje warstwę fizyczną (PHY – ang. *Physical Layer*) oraz warstwę dostępu do medium (MAC – ang. *Medium Access Control Layer*). Standard ten definiuje prosty lecz silny protokół pakietowy o następujących właściwościach:

- wysoka niezawodność uzyskana dzięki zastosowaniu potwierdzania odbioru,
- mechanizmy zapewniające integralność oraz poufność transmisji,
- transmisja z rozpraszaniem widma metodą sekwencji bezpośredniej,
- łączność oparta na priorytetach,
- możliwość zmiany częstotliwości dla uniknięcia interferencji.

W protokole IEEE 802.15.4 zdefiniowano dwa typy węzłów: węzeł o zmniejszonej funkcjonalności RFD (ang. *Reduced Functionality Device*) oraz węzeł o pełnej funkcjonalności FFD (ang. *Full Functionality Device*). Węzeł końcowy zawierający układy wejścia-wyjścia (np. sensory) może być typu FFD ale bardzo często wystarcza ograniczona struktura sprzętowa i programowa RFD – tańsze rozwiązanie z mniejszym zapotrzebowaniem na

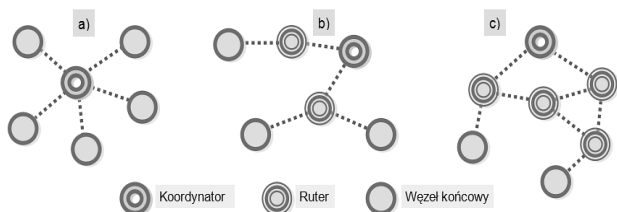
energie. Węzeł, który zarządza pracą sieci (koordynator) musi być typu FFD. W 802.15.4 dostępne są dwie konfiguracje sieci: *star* i *peer-to-peer* (rys. 2). RFD może być użyty tylko w konfiguracji gwiazdy, ponieważ może realizować połączenia tylko z koordynatorem. Dla FFD nie ma ograniczeń, może występować w topologii, gdzie realizowana jest komunikacja również między dowolnymi węzłami.



Rys. 2. Konfiguracje: a) star i b) peer-to-peer dostępne w protokole IEEE 802.15.4

W 2005 roku dostępna była pierwsza wersja standardu ZigBee (rozszerzenia 2006 i 2007 r.), opartego na IEEE 802.15.4. ZigBee rozszerza możliwości protokołu IEEE 802.15.4 w zakresie realizacji różnych struktur sieciowych, bezpieczeństwa transmisji oraz organizuje interfejs z warstwą aplikacyjną [12, 25, 26]. ZigBee uważany jest za standard, który ma szansę stać się globalnym rozwiązaniem dla wszechstronnych zastosowań. W ZigBee występują trzy podstawowe konfiguracje (rys. 3):

- topologia gwiazdy (ang. Star Topology) – jest to najprostsza konfiguracja sieci ZigBee, wszystkie węzły końcowe muszą znajdować się w zasięgu koordynatora; koordynator może pełnić rolę rutera,
- topologia drzewa (ang. Tree Topology) – umożliwia korzystanie z rutera ale nie pozwala na zmianę ścieżki transmisji danych,
- topologia siatki (ang. Mesh Topology) – zapewnia pełne możliwości komunikacyjne; koordynator i routery mogą wymieniać dane między sobą; możliwe są alternatywne ścieżki wymiany danych.



Rys. 3. Konfiguracje: a) gwiazdy, b) drzewa oraz c) siatki w protokole ZigBee; koordynator musi być węzłem FFD, natomiast węzeł końcowy może być typu RFD lub FFD

W warstwie fizycznej standardu IEEE zdefiniowano trzy pasma częstotliwości: 2,4GHz, 915MHz (USA) i 868MHz. W Europie dostępne są dwa pasma – 868 MHz (tylko jeden kanał) i 2,4GHz (16 kanałów). Dla celów przemysłowych, zdecydowanie lepszym zakresem jest 2,4GHz – duża liczba kanałów, większa szybkość transmisji oraz skuteczniejsza modulacja. Stosowana jest złożona modulacja fazowa z rozpraszaniem widma metodą sekwencji bezpośredniej DSSS (ang. *Direct Sequence Spread Spectrum*). W przypadku modulacji O-QPSK (ang. *Offset Quadrature Phase-Shift Keying*) cztery kolejne bity informacyjne, tworzące tzw. symbol zastępowane są odpowiednio dobraną (1 z 16) sekwencją 32 bitów (ang. *chips*). Daje to możliwość pracy przy słabym współczynniku S/N (ang. *Signal to Noise Ratio*, stosunek sygnału do szumu), wynikającym albo z powodu zakłóceń albo niskiej mocy nadajnika.

Protokół ZigBee umożliwia tworzenie bardzo rozległych, złożonych struktur sieciowych uwzględniających problematykę wyszukiwania trasy transmisji pakietów (rutowania). Trzeba jednak zaznaczyć, że ZigBee stanowi rozwiązanie wymagające większych zasobów w porównaniu z IEEE 802.15.4, jest więc bardziej kosztowne, a ponadto ma wyższe wymagania energetyczne z powodu konieczności obsługi dodatkowych warstw protokołu.

Z dużym prawdopodobieństwem można wnioskować, że protokoły IEEE 802.15.4/ZigBee zdominują obszary zastosowań bezprzewodowej transmisji małej mocy. Wynika to z rosnącego zainteresowania producentów – wszyscy znani producenci mikrokontrolerów w swoich ciągle rozszerzanych ofertach mają układy radiowe ZigBee oraz tzw. SoC (ang. *System on Chip*) zawierające mikrokontrolery zintegrowane z układami radiowymi. Dostarczają również gotowe stopy protokołów IEEE 802.15.4 oraz ZigBee co zdecydowanie ułatwia tworzenie aplikacji takich sieci. Mankamentem jest natomiast fakt, że stopy programowe obsługujące te same protokoły patrząc od strony warstwy aplikacyjnej nie są ze sobą kompatybilne. Przykładowo firma Atmel dostarcza stos o nazwie BitCloud [6], firma Texas Instruments – Z-Stack [1], firma Freescale - RF4CE Protocol [4,5], firma Microchip – ZigBee-2006 Stack [3]. Protokół IEEE 802.15.4 stał się również podstawą innych protokołów jak np. 6LoWPAN [19], SMAC [20], MiWi [2]. Wsparciem dla wyżej postawionej tezy o przyszłości protokołów ZigBee/IEEE 802.15.4 jest współpraca ESMIG (ang. *European Smart Metering Industry Group*) z ZigBee Alliance w celu opracowania standardu komunikacji dla potrzeb inteligentnych systemów pomiarowych w Unii Europejskiej [27].

Najważniejsze wymagania, które powinny spełniać sieci bezprzewodowe małej mocy dla realizacji zadań w ramach systemów AMR można określić następująco:

- energooszczędność węzłów sieci,
- bezpieczeństwo transmisji danych pomiarowych (integralność i poufność),
- niezawodność sprzętowa i programowa,
- niski koszt,
- topologia sieci – głównie gwiazda.

Większość wymagań jest oczywista bądź została wyjaśniona wcześniej. Komentarza może wymagać topologia sieci. Najprostsze rozwiązania AMR korzystają z konfiguracji punkt-punkt, natomiast w większości przypadków potrzebną i wystarczającą konfiguracją jest gwiazda. Węzeł centralny gromadzi pomiary z poszczególnych węzłów sensorowych połączonych z urządzeniami pomiarowymi. Ponieważ w budynkach, zwłaszcza o konstrukcji żelbetonowej, mogą występować trudne warunki propagacyjne dla fal radiowych i dlatego czasami może wystąpić potrzeba prostej retransmisji pakietów pomiarowych. Natomiast tylko w nielicznych przypadkach w systemach AMR może zachodzić potrzeba skorzystania z bardziej złożonych topologii sieciowych (np. ZigBee o pełnych możliwościach) uwzględniających rutowanie pakietów transmisyjnych.

Oczywiście poza IEEE 802.15.4/ZigBee można znaleźć bardzo wiele protokołów, które spełniają wymagania systemów AMR. Zalety prostych protokołów to mniejsze wymagania związane z zasobami pamięciowymi węzłów oraz krótsze algorytmy obsługi węzłów i w rezultacie przy tej samej częstotliwości zegara mikrokontrolera wymagany czas aktywności węzła jest również krótszy. Przekłada to się na niższy koszt węzła i większą energooszczędność. Przykładowe wymagania pamięciowe dla protokołów firmy Freescale Semiconductor sieci bezprzewodowych o różnej złożoności [4]:

- SMAC – uproszczony protokół oparty na warstwie fizycznej 802.15.4; 2,5 – 4 kB + kod aplikacji,
- 802.15.4 MAC – protokół oparty na warstwie fizycznej i warstwie dostępu do medium 802.15.4; 24 – 27 kB + kod aplikacji,
- ZigBee Stack – protokół kompatybilny z ZigBee; 40-50 kB + kod aplikacji.

3. WIRELESS M-BUS

Prace nad przeniesieniem koncepcji M-BUS do rozwiązań bezprzewodowych rozpoczęto w roku 1998 [24]. Dla potrzeb transmisji danych pomiarowych proponowane jest pasmo ISM (ang. Industry, Science, Medicine) 868,0-868,6 MHz (<25 mW) ponieważ jest stosunkowo mało obciążone a układy transmisyjne są tanie. Dla celów ręcznej i automatycznej sygnalizacji wykorzystującej krótkie telegramy, rzadko przesyłane preferuje się pasmo 868,7-869,2 MHz (<25 mW). Dla zadań komunikacji bezprzewodowej w obrębie lub między budynkami

wymagających sporadycznej transmisji większej liczby danych zaleca się pasmo 869,4-869,65 MHz (<500 mW). Kolejne założenia są następujące: obsługa licznika kontrolowanego medium nie powinna zajmować dłużej niż łącznie 0,5 s w ciągu każdego dnia ze względu na dopuszczalne obciążenie pasma. Proponowana prędkość transmisji sygnału wynosi 19200 Bd.

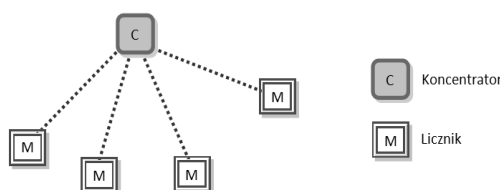
Integralność telegramów ma być zapewniona przy pomocy CRC16 o wielomianie generującym

$$g(x)=x^{16}+x^{13}+x^{12}+x^{11}+x^{10}+x^8+x^6+x^5+x^2+1. \quad (2)$$

Telegramy powinny być oparte na zaleceniach IEC870-5-1 oraz EN1334-3. Transmisja radiowa danych pomiarowych wymaga poufności stąd wynika potrzeba ich szyfrowania.

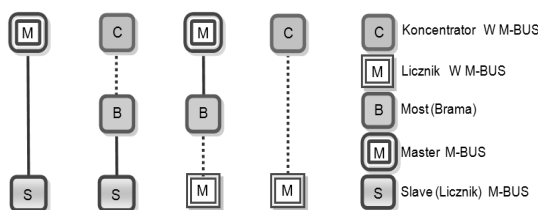
Pierwsza wersja specyfikacji Wireless M-BUS została opublikowana w 2003 roku [17]. Kolejne pojawiły się w następnych latach. Standard określa komunikację między licznikami wody, gazu, ciepła oraz energii elektrycznej a koncentratorami. Wireless M-BUS może być stosowany w kilku trybach (S, T i R) związanych z transmisją jednokierunkową (S1, S1-m, T1) lub dwukierunkową (S2, T2, R2) w systemach stacjonarnych i mobilnych (S1-m).

Na poziomie warstwy fizycznej telegramy modulowane są kodem Manchester lub kodem „3 z 6”. Podstawową topologią sieci Wireless M-BUS jest gwiazda. Taka konfiguracja złożona jest z węzłów-liczników oraz koncentratora, tzn. węzła, który zbiera pomiary (rys. 4). Podstawową zasadą obowiązującą w sieci jest autonomiczna praca liczników. W trybach jednokierunkowych liczniki są wyłącznie nadajnikami a koncentrator jest tylko odbiornikiem. W trybach dwukierunkowych nadajniki okresowo generują żądanie dostępu a koncentrator może rozpocząć transmisję z danym licznikiem wysyłając do niego potwierdzenie (ACK).



Rys. 4. Topologia gwiazdy sieci Wireless M-BUS

Wspólne podstawy sieci M-BUS i Wireless M-BUS oznaczają łatwość konwersji protokołów obu sieci. Na rys. 5 przedstawiono możliwości łączenia węzłów.



Rys. 5. Możliwości konfiguracji sieci M-BUS i Wireless M-BUS

Transmisja w sieci Wireless M-BUS jest realizowana przy pomocy telegramów, które mogą być złożone z kilku bloków. W najprostszym przypadku jest to pojedyncza ramka (pierwszy blok). Jeżeli zachodzi potrzeba przesłania danych (pakiet danych nie może przekraczać 255 bajtów) wtedy pełen telegram składa się z ciągu wielu ramek – dane dzielone są na bloki o długości 15 bajtów. Ostatni blok może zawierać 16 bajtów. Każda z ramek w zależności od trybu transmisji jest poprzedzona odpowiedniej długości preambułą i słowem synchronizacyjnym. W Wireless M-BUS ramka jest tworzona z ciągu bitów i dlatego stosuje się silniejsze niż w M-BUS

zabezpieczenie integralności mające postać słowa kontrolnego CRC16.

W specyfikacji EN 13757-3, dotyczącej warstwy aplikacyjnej przedstawiono również propozycje zapewnienia poufności transmisji. W standardzie przyjęto metodę szyfrowania DES (ang. *Data Encryption Standard*) w trybie kodowania CBC (ang. *Cipher Block Chaining*). Obecnie algorytm szyfrowania DES uznawany jest za niebezpieczny.

Ograniczona normą moc nadawania sygnałów radiowych limituje maksymalną odległość między węzłem licznika a węzłem koncentratora, przy której można zrealizować poprawną transmisję. Zasięg zależy od bardzo wielu czynników. Jednym z nich jest miejsce rozmieszczenia węzłów. Największy zasięg można uzyskać w terenie otwartym. W budynkach występuje znaczące tłumienie sygnałów radiowych zależne od technologii wykonania zabudowy. Z wyżej zasygnalizowanych powodów często zachodzi potrzeba retransmisji telegramów. Dla sieci Wireless M-BUS taką możliwość uwzględniono w specyfikacji EN 13757-5. Proponowane są dwie metody. Pierwsza polega na rozgłaszaniu pakietów za pośrednictwem węzłów retransmisyjnych. Węzeł retransmisyjny, który odbierze pakiet z licznika przesyła go dalej. Kolejne węzły, które znajdują się w zasięgu poprzednika kontynuują retransmisję. Na jakimś etapie rozsyłania pakiet trafia do węzła przeznaczenia. W drugiej metodzie przyjęto rozszerzenie formatu każdej ramki o pole trasy pakietu. Ustalenie trasy wymaga realizacji specjalnej procedury.

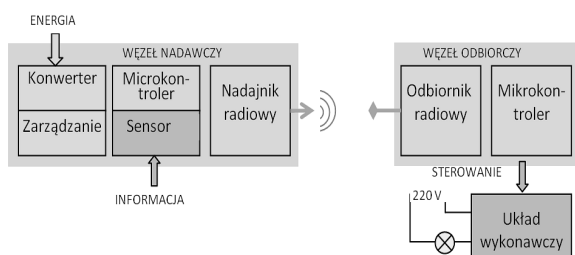
4. PROTOKÓŁ EnOcean

EnOcean GmbH jest niewielką niemiecką firmą powstałą w 2001 roku. Jest ona producentem i dostawcą modułów do transmisji bezprzewodowej dla takich firm jak Siemens, Osram, Wieland Electric, Wago itd., przeznaczonych do automatyzacji budynków (np. klimatyzacja, oświetlenie) a także w przemyśle motoryzacyjnym. Główne założenie tych produktów (podstawowa cecha sieci EnOcean) to bezbateryjne zasilanie węzłów nadawczych (tzw. samozasilające sensory bezprzewodowe). Do zasilania wykorzystuje się różne rozwiązania jak mikrogeneratory elektromagnetyczne, piezoelektryczne, baterie słoneczne czy termoogniwa.

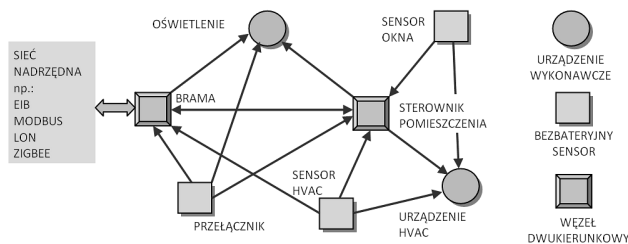
Sieć EnOcean [13,16,18,21] może zawierać trzy podstawowe typy węzłów, tzn. bezbateryjne radiosensory (nadajniki), układy wykonawcze (odbiorniki) oraz węzły nadawczo-odbiorcze, które mogą pełnić rolę m.in. urządzeń końcowych, retransmisyjnych jak i bram do innych sieci (np. LON, EIB, Modbus, ZigBee) – rys. 7. Podstawowym pasmem częstotliwości jest 868 MHz. Prędkość transmisji wynosi 125 kbit/s. Przyjęta ramka transmisyjna ma stałą długość 14 bajtów, co oznacza, że czas jej transmisji wynosi około 0,9 ms.

Ramka ma bardzo prostą budowę. Rozpoczyna się od części startowej, zawierającej 2 bajty synchronizacyjne, bajt nagłówka rozróżniający typ ramki (np. ramkę danych od ramki uczącej) oraz bajt określający organizację ramki w zależności od typu węzła nadawczego. Kolejne cztery bajty przeznaczone są na pole danych, a następne cztery tworzą unikatowy 32 bitowy numer nadajnika (sensora), ustalany przez producenta. Kolejny bajt określa stan sensora oraz zawiera licznik powtórzeń wiadomości. Ramkę zamyka suma kontrolna uzyskana jako młodszy bajt z sumy wszystkich bajtów ramki z pominięciem pola synchronizacji.

Na rysunkach 6 i 7 zilustrowano ogólną koncepcję sterowania bezprzewodowego w systemie EnOcean. Jednym z podstawowych założeń tej sieci są bezbateryjne sensory.

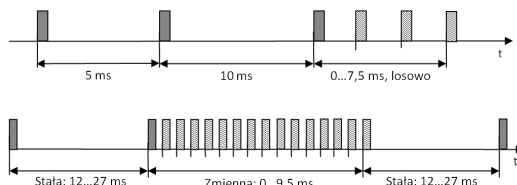


Rys. 6. Technologia EnOcean



Rys. 7. Architektura systemu EnOcean

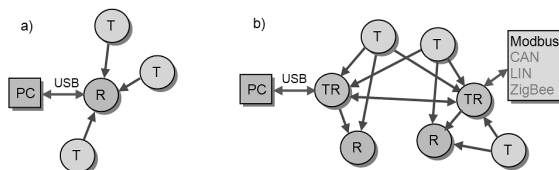
Ponieważ wszystkie węzły sensorów (nadajniki) mogą rozpocząć transmisję w dowolnym momencie. Ponadto węzły te nie są wyposażone w odbiorniki i nie mogą monitorować stanu medium co zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia kolizji. W związku z tym przyjęto trzykrotne powtarzanie tej samej ramki w różnych odstępach czasowych. Na rys. 8 przedstawiono dwa typy zależności czasowych, stosowanych dla różnych typów węzłów. Górny rysunek pokazuje wielokrotną transmisję tej samej ramki stosowaną dla węzłów typu przełącznik (PTM) a dolny prezentuje sytuację dla sensorów zasilanych z baterii słonecznej (STM). W przypadku węzłów STM uzależniono ponadto odstęp między ramkami od temperatury węzła. Takie rozwiązania spowodowały, że znacznie zmniejszono możliwość wystąpienia kolizji pomimo braku kontroli stanu medium w węzłach nadawczych.



Rys. 8. Zależności czasowe w protokole EnOcean dla różnych typów węzłów [2,3]

5. PROTOKÓŁ SiWiNet

Podstawowym założeniem dla protokołu SiWiNet była jego opcjonalność polegająca na możliwości zmian zabezpieczeń ramki (różne metody zapewnienia integralności przesyłanych danych oraz poufności ich transmisji) oraz różne metody dostępu do medium [11, 13].



Rys. 9. Przykładowe konfiguracje sieci SiWiNet:
a) prosta sieć; b) złożona konfiguracja; objaśnienia:
T – węzeł nadawczy, R – węzeł odbiorczy, TR – węzeł retransmisyjny (nadawczo-odbiorczy)

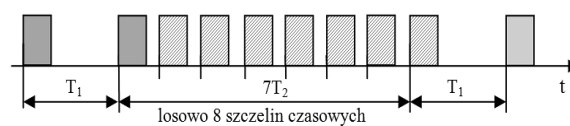
Sieć może być tworzona z trzech typów węzłów: T – nadawczy, R – odbiorczy i TR – nadawczo-odbiorczy (rys. 9). Mimo rozróżnienia funkcji wszystkie węzły mogą mieć jednakową budowę, zwłaszcza, że współczesne, monolityczne układy radiowe z reguły zawierają część nadawczą i odbiorczą. Najmniej skomplikowanym rozwiązaniem jest sieć złożona z jednego odbiornika (R) i wielu nadajników (T) – rys. 9a. Podstawą sieci są węzły nadawcze, które mogą rozpocząć transmisję w dowolnym momencie i dlatego węzeł odbiorczy musi być włączony na ciągły nasłuch. Działanie węzła nadawczego może być realizowane w cyklu: uśpienie, pomiar

i przetwarzanie sygnałów pomiarowych, transmisja, uśpienie itd. Taki tryb pracy pozwala na minimalizację zużycia energii.

W sieci SiWiNet podstawową formą wymiany wiadomości jest transmisja jednoskokowa (ang. *one-hop*). Odbiornik znajduje się w zasięgu nadajników. W przypadku gdy sygnał któregoś z nadajników, dostarczającego subskrybowanych przez odbiornik wiadomości, jest silnie sflumiony (nie zapewnia poprawnego odbioru) można zastosować węzły typu TR do stałej retransmisji wybranych wiadomości (rys. 9b). Węzły typu TR mogą być stosowane również np. jako brama do połączenia sieci SiWiNet z miejscową (np. Modbus, CAN, LIN) lub z siecią inną bezprzewodową, np. ZigBee. Mogą również realizować transmisję z innymi węzłami TR.

Ramka rozpoczyna się od preambuły, którą tworzą bajty o wartości 55 Hex (ciąg zero-jedynkowy). Początek ramki rozpoznawany jest za pomocą bajtu synchronizującego. W omawianym protokole ma on szersze znaczenie. Ma on wpływ na pewność dostępu węzła do medium transmisyjnego – określa liczbę powtórzeń danej ramki. Ponadto identyfikuje ramkę rejestracyjną, która umożliwi automatyczne rozszerzanie sieci o nowe węzły. Kolejne pole składające się z czterech bajtów to identyfikator węzła MID. Każdy węzeł sensorowy (nadawczy) otrzymuje unikatowy numer identyfikacyjny z zakresu wartości 256 do 4294967295 ($2^{32}-1$). Zakres 0 – 255 przeznaczony jest dla celów uruchomieniowo testowych (węzeł nie wymaga rejestracji). Następny bajt ORG określa zabezpieczenie transmisyjne ramki oraz długość pola danych. Organizację pola danych definiuje typ węzła nadawczego (liczba sygnałów binarnych, liczba sygnałów analogowych, rozdzielczość, justowanie wyniku). W celu zapewnienia poufności i autentyczności (uwierzytelnianie) transmisji danych, w protokole SiWiNet wprowadzono możliwość szyfrowania blokowego z kluczem symetrycznym. Jako algorytm szyfrujący wybrano standard AES (ang. *Advanced Encryption Standard*), zaakceptowany w 2000 r. SiWiNet wykorzystuje AES-128 [10]. Protokół umożliwia automatyczne dołączanie nowych węzłów do sieci, co wymaga użycia specjalnej ramki rejestracyjnej. Akceptacja nowego węzła następuje na podstawie identyfikatora sieci NID, który umieszczony jest w części zaszyfrowanej ramki rejestracyjnej. Po rejestracji węzeł sensorowy posługuje się wyłącznie adresem MID. Węzeł może być wyrejestrowany wyłącznie z poziomu odbiornika. W ramce rejestracyjnej zdefiniowany jest również typ węzła nadawczego MT, który określa takie cechy jak liczba sygnałów binarnych, liczba sygnałów analogowych, format danych analogowych, ewentualne justowanie wyniku pomiaru, czy pomiary realizowane są zdarzeniowo czy okresowo, częstotliwość pomiarów a także czy węzeł nadawczy korzysta z własnego odbiornika na etapie rywalizacji o dostęp do medium transmisyjnego.

Szeroka opcjonalność omawianego protokołu wynika z jego podstawowego edukacyjnego przeznaczenia. Dla celów pomiarowych przyjęto najsilniejszą opcję protokołu. Obejmuje ona zabezpieczenie integralności ramki typu CRC16 ($G(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$) oraz szyfrowanie AES-128. Ramka jest wysyłana przez nadajniki w trybie trzykrotnego powtarzania (rys. 10).



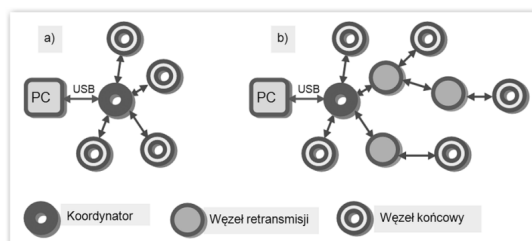
Rys. 10. Zależności czasowe w protokole SiWiNet

Odstęp T_1 jest stały, zależy od typu węzła oraz parametrów układu transmisyjnego. Drugie powtórzenie ramki następuje w jednej z ośmiu szczelin czasowych odległych o T_2 .

6. PROTOKÓŁ WMN

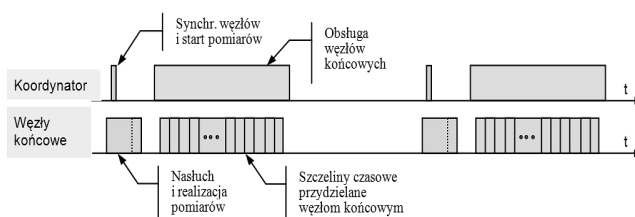
Protokół WMN [10,11] (ang. *Wireless Measuring Network*) jest prostym bezpiecznym rozwiązaniem dla realizacji sieci typu *one-hop* o konfiguracji gwiazdy (rys. 11a). W przypadku problemów z zasięgiem przewidziano możliwość retransmisji (rys. 11b).

Komunikacją w sieci WMN zarządza koordynator. Oznacza to, że węzły końcowe mogą jedynie realizować zadania zlecone przez koordynatora. W protokole WMN występują dwa typy pakietów: ramka podstawowa oraz ramka krótka. Ramka krótka stosowana jest w przypadku funkcji nie wymagających danych, np. potwierdzenia ramek, ramka błędów transmisji. Ramka podstawowa (ramka z danymi) ma stałą długość (25 bajtów) co wynika z przyjętej możliwości szyfrowania blokowego z kluczem symetrycznym AES-128. Szyfrowanie obejmuje pole danych DAT i kontrolne CRC16. W ramce krótkiej (11 bajtów) pole danych nie występuje. Ramki zawierają numer identyfikacyjny sieci oraz rzeczywisty adres węzła docelowego.



Rys. 11. Topologia gwiazdy w sieci WMN

Załączenie zasilania lub reset sprzętowy powoduje ustawienie stanu węzła na aktywny. Koordynator po inicjacji dokonuje sprawdzenia obecności węzłów sieci. Testuje dostępne pole adresowe sieci. Następnie przechodzi do indywidualnego konfigurowania węzłów sieci.



Rys. 12. Zależności czasowe w sieci WMN w energooszczędnym trybie pomiarowym

W energooszczędnym trybie pomiarowym (rys. 12) węzły końcowe otrzymują informacje o czasie wybudzeń oraz przydzielonej szczeliny czasowej (kolejności odpytywania). Węzły mogą być grupowane według rodzaju pomiaru (różne cykle aktywności).

7. PODSUMOWANIE

Dla zastosowań pomiarowych radiowych sieci małej mocy istotnym parametrem jest czas pracy (możliwie najdłuższy) węzła na jednym komplecie baterii. Wyjątkiem są tutaj moduły współpracujące z licznikami energii elektrycznej. W pozostałych licznikach domowych bezpośredni dostęp do energii elektrycznej jest utrudniony. Korzystniejszym rozwiązaniem jest niezależne bateryjne zasilanie węzłów pomiarowych. Aktualnie dostępne elementy stosowane do konstruowania sieci bezprzewodowych nie pozwalają na wieloletnią pracę węzła bez wymiany baterii. Niezbędne są odpowiednie algorytmy pracy sieci – węzeł zasilany bateryjnie powinien być aktywny możliwie jak najkrócej.

W przypadku zastosowań masowych największe znaczenie mają standaryzowane protokoły uniwersalne ZigBee, IEEE 802.15.4 i inne rozwiązania pochodne. Wynika to z niskich kosztów węzłów w produkcji wielko-seryjnej, taniego i jednolitego oprogramowania a w następstwie również niskie koszty instalacji, eksploatacji i serwisowania.

W niektórych zastosowaniach pomiarowych mniej powszechnych, tańszym i lepszym rozwiązaniem mogą okazać się sieci prostsze a to ze względu, np. na cechy szczególne aplikacji, dobrze rozpoznany i czytelny

protokół sieci, krótsze oprogramowanie i w rezultacie krótszy czas obsługi węzła, mniejsze wymaganie sprzętowe i szereg innych zalet wynikających z konkretnego protokołu. Przykładowo EnOcean zapewnia bezbaterijną pracę węzłów nadawczych. SiWiNet i WMN gwarantują wysokie bezpieczeństwo transmisji. Sieć SiWiNet jest idealnym rozwiązaniem dla aplikacji, w których węzły przekazują wyniki pomiarów w trybie asynchronicznym – wtedy kiedy zmiana mierzonego parametru przekroczy określony limit. Sieć WMN umożliwia synchroniczne wykonywanie pomiarów we wszystkich punktach pomiarowych (wszystkich węzłach sieci). Protokół WMN z powodzeniem może być stosowany w sieciach BSN (ang. *Body Sensor Networks*) [7] zasadniczo przeznaczone są do zastosowań biomedycznych ale również dla biopomiarów w sporcie, rekreacji, rozrywce (gry) itp. WMN jest jednocześnie siecią uniwersalną pozwalającą na realizację różnych scenariuszy zapisanych w pamięci kontrolera.

LITERATURA

- [1] AN053, Measuring power consumption with CC2430 & Z-Stack. Texas Instruments, 2007.
- [2] AN1066, MiWi™ Wireless Networking Protocol Stack. Microchip Technology Inc., 2007.
- [3] AN123, Microchip ZigBee-2006 Residential Stack Protocol. Microchip Technology Inc., 2008.
- [4] AN3403, IEEE® 802.15.4 / ZigBee™ Application Note. Rev. 0.0, Freescale, 2007.
- [5] AN3403, IEEE® 802.15.4 / ZigBee™, Software Selector Guide. Freescale Semiconductor, 2007.
- [6] BitCloud User Guide, 8199D–MCU Wireless–05/09. Atmel, 2009.
- [7] Guang-Zhong Yang: *Body Sensor Networks*. Springer, 2006.
- [8] Holger K., Willing A.: *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
- [9] IEEE Std 802.15.4™, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). New York, IEEE, 2003.
- [10] Kubiak Z.: Bezprzewodowa sieć pomiarowa WMN, rozdz. 45, w Zieliński Z. (red.) "Systemy czasu rzeczywistego. Postępy badań i zastosowania", WKŁ, Warszawa 2009, s. 507-516.
- [11] Kubiak Z.: Bezprzewodowe sieci sensorowe o małym zasięgu. Rozdz. 2 w: Kwiecień A., Gaja P. (red.) „Techniczne i teoretyczne aspekty współczesnych sieci komputerowych”, WKŁ, Warszawa 2009, s. 19-26.
- [12] Kubiak Z.: Problematyka bezpieczeństwa radiowych sieci małej prędkości ZigBee. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka z. 145, rozdz. 15. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006, s. 119 – 124.
- [13] Kubiak Z.: SiWiNet – Protokół dla sieci sensorowej. w: Gaja P. (red.) *Współczesne Aspekty Sieci Komputerowych*, Tom 1, rozdz. 6 WKŁ. Warszawa 2008, s. 69-76.
- [14] Kubiak Z., Urbaniak A.: Bezprzewodowy dostęp do urządzeń pomiarowych. W: Gaja P. (red.) *Systemy Czasu Rzeczywistego*, rozdz. 24. WKŁ, Warszawa 2005, s. 257 – 268.
- [15] Kubiak Z., Urbaniak A.: Systemy monitorowania zużycia mediów w budynkach. *Rynek Energii*, nr 5 (84)/2009, s. 22-31.
- [16] Pushbutton Transmitter Device PTM 200. EnOcean, 2007.
- [17] prEN 13757-4. Communication systems for meters and remote reading of meters - Part 4: Wireless meter readout (Radio Meter reading for operation in the 868-870 MHz SRD band), CEN, Brussels 2003.
- [18] RF Sensor Transmitter Module STM 100. EnOcean, 2005.
- [19] Shelby Z., Bormann C.: *6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet*, John Wiley & Sons, Inc., 2009.

- [20] Simple Media Access Controller (SMAC), User's Guide, Document Number: SMACRM Rev. 1.5, Freescale Semiconductor, 2008.
- [21] Standarization EnOcean Communication Profiles, En Ocean GmbH, 2007.
- [22] Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). New York, IEEE, 2003.
- [23] Yuan Li, Wei Ye, Heidemann J.: Energy and Latency in Low Duty Cycle Mac Protocols. In Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference. New Orleans, LA, USA, March, 2005.
- [24] Ziegler H.: M-BUS WG4. Proposal for a Future 868 MHz Communication Standard. University of Paderborn, 1998.
- [25] ZigBee Specification. ZigBee Document 053474r13. ZgBee Standards Organization, 2006.
- [26] ZigBee®Wireless Networking Overview, Texas Instruments, 2008.
- [27] <http://www.zigbee.org>

WIRELESS NETWORKS FOR REMOTE MEASUREMENT SYSTEMS

Key words: intelligent sensors, wireless measurement networks, measurement protocols

Summary. In the paper there are reviewed the solutions within the field of data transmission in wireless measurement networks. There are also developed the requirements set for this kind of solutions, taking into account the way of transmission and its quality. There are characterized the working modes of network nodes that perform many different functions: measurement, two-way transmission, coordination, data concentration or routing ones. The special demands are underlined in the range of network nodes' energy supply. There are recommended low-energy solutions enabling measurement nodes to work without the necessity of battery change for a long period of time. The energy economy effect is obtained by use of microprocessors working in the sleep mode with minimal energy consumption and turned on only for the short time activity needed for measurement and data transmission. There are presented characteristics of the most often used specialized transmission protocols in wireless networks, both simple and more complicated ones. On this basis there are formulated the conclusions respect to possible applications.

Zygmunt Kubiak, dr inż., adiunkt w Instytucie Informatyki Politechniki Poznańskiej. Zajmuje się głównie problematyką przetwarzania i kodowania informacji pomiarowych, zastosowaniem nowoczesnych tzw. inteligentnych czujników pomiarowych, projektowaniem systemów wbudowanych, programowaniem mikrokontrolerów i sterowników PLC. Aktualnie jego prace koncentrują się wokół zagadnień bezprzewodowych sieci sensorowych.
E-mail: zygmunt.kubiak@cs.put.poznan.pl

Andrzej Urbaniak, dr hab. inż., profesor w Instytucie Informatyki Politechniki Poznańskiej. Pełni również funkcję prorektora w Państwowej Wyższej Szkole Zawodowej w Gnieźnie. Zajmuje się zastosowaniami automatyki i informatyki w ochronie i inżynierii środowiska. Prowadzone prace badawcze koncentrują się wokół problemów modelowania i symulacji procesów i obiektów, monitorowania i sterowania procesami, syntezy algorytmów sterowania wykorzystujących elementy sztucznej inteligencji oraz wykorzystaniem systemów wbudowanych. Zainteresowania: muzyka, historia i problematyka wychowawcza. E-mail: andrzej.urbaniak@cs.put.poznan.pl