

Przegląd protokołów wąskopasmowej transmisji danych po liniach energetycznych

Streszczenie. W artykule przedstawiono trzy podstawowe standardy wąskopasmowej transmisji danych (ang. *Narrowband Transmission*) wykorzystywane do odczytu danych z inteligentnych liczników energii elektrycznej, dla których medium transmisyjnym są linie energetyczne niskiego napięcia. Omówiono zalecenia implementacyjne warstw fizycznej i łącza danych, ze szczególnym uwzględnieniem wykorzystywanych technik modulacji i kodowania kanałowego.

Abstract. The paper presents three fundamental standards of narrowband transmission used for smart meters readout using low voltage power lines as a transmission medium. The recommendations for the physical layer and media access layer with a special emphasis on modulation and channel coding techniques are discussed. **A review of narrowband powerline data transmission protocols**

Słowa kluczowe: Transmisja danych po liniach energetycznych, PLC, modulacja OFDM, protokół PRIME, G3-PLC, OSGP.

Keywords: Power Line Communication, OFDM modulation, PRIME protocol, G3-PLC, OSGP

Wprowadzenie

Komunikacja pomiędzy koncentratorem umiejscowionym w stacji SN/nn, a urządzeniem „końcowym” (inteligentnym licznikiem energii elektrycznej) realizowana może być przy wykorzystaniu różnorodnych technologii transmisji danych. Jedną z możliwych do wykorzystania jest technologia PLC (ang. *Power Line Communications*), wykorzystująca jako medium transmisyjne linie energetyczne. Zastosowanie tego typu technologii w znacznym stopniu upraszcza proces wprowadzania systemów inteligentnego opomiarowania, a wykorzystanie już istniejącej infrastruktury kablowej dla potrzeb realizacji transmisji, znacznie obniża koszty wdrożenia.

Wiele firm i instytucji zrzeszających producentów oferuje obecnie urządzenia do transmisji danych po liniach energetycznych. Należą do nich min.:

- PRIME Alliance (Intelligent Metering Evolution Powerline),
- G3-PLC Alliance,
- OSGP Alliance (Open Smart Grid Protocol),
- Energy Services Association Network (ESNA),
- Meters And More Open Technologies,
- HD-PLC Alliance.

Praktycznie każda z tych firm oferuje swoje własne urządzenia transmisyjne, niekompatybilne z urządzeniami pozostałych producentów. Wszystkie one bazują jednak na takich samych technikach bezpośredniego sterowania kanałem transmisyjnym (tak zwana warstwa fizyczna procesu transmisji) wynikających z narzuconych przez normę europejską EN 50065 reguł. Norma zakłada, że transmisja sygnałów po sieciach energetycznych niskiego napięcia realizowana może być w zakresie częstotliwości od 3kHz do 148,5kHz. Pasma to podzielone jest na następujące podpasma:

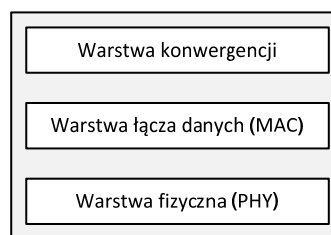
- A (3-95kHz) - przeznaczone dla dostawców energii elektrycznej,
- B, C i D przeznaczone dla komunikacji publicznej, zgodnie z regułami:
 - B (95-125kHz) - przeznaczone dla dowolnych protokołów,
 - C (125-140 kHz), w którym wymagane są protokoły zgodne z CSMA (ang. *Carrier Sense Multiple Access*), D (140-148,5 kHz) przeznaczone dla dowolnych protokołów. [1][2]

Oznacza to, że w systemach inteligentnego opomiarowania, wykorzystywane jest (przez dostawców energii elektrycznej) dla potrzeb automatycznego odczytu liczników energii

pasmo 3-95kHz. Niestety producenci sprzętu wykorzystują do realizacji procesu transmisji różne podpasma częstotliwościowe, zróżnicowane techniki modulacji i niekompatybilne protokoły transmisyjne.

Protokół PRIME

Protokół PRIME (ang. *PowerLine Intelligent Metering Evolution*) definiuje zalecenia implementacji warstwy fizycznej i MAC oraz warstwy konwergencji, zapewniającej optymalne współdziałanie aplikacji użytkownika i protokołu transmisyjnego (Rys. 1). Jest protokołem otwartym, umożliwiającym współdziałanie urządzeń różnych producentów. [3]



Rys.1. Struktura warstw protokołu PRIME

W warstwie fizycznej bazuje na modulacji OFDM (ang. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), w paśmie zgodnym z normą CENELEC-A i pozwala na realizację transmisji z maksymalną prędkością 10kbps. PRIME jest systemem łączącym w jedną całość podsieci, zawierające urządzenia połączone w topologii drzewa. W podsieci zainstalowane są dwa rodzaje węzłów:

- bazowy,
- serwisowe.

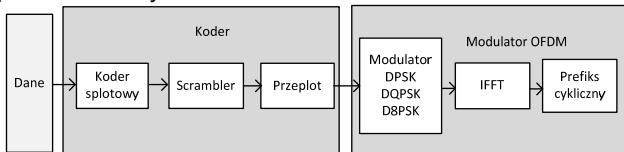
Węzeł bazowy jest głównym elementem podsieci. Zarządza komunikacją z węzłami serwisowymi i stanowi bramę wyjściową do systemu nadrzędnego. Komunikacja z węzłami serwisowymi odbywa się w trybie *Master-Slave*, węzeł bazowy inicjuje każdą transmisję. Odpowiedzialny jest również za konstruowanie podsieci. Początkowo (po inicjalizacji) stanowi jej jedyny element, stopniowo rozsyłając zaproszenia i przyłączając do sieci kolejne węzły serwisowe poszerza jej strukturę. W każdej podsieci może funkcjonować tylko jeden węzeł bazowy.

Węzły serwisowe stanowią rozproszone zasoby sieci i mogą znajdować się w jednym z trzech trybów pracy:

- odłączenia – węzeł nie realizuje żadnej transmisji danych, poszukuje sieci znajdującej się w jego zasięgu i próbuje się do niej dołączyć,
- terminala - węzeł może przekazywać swoje dane do sieci,
- przełącznika (ang. *switch*) – węzeł wysyła do sieci swoje dane, ponadto przekazuje do sieci dane otrzymane od innych węzłów.[3..5]

Warstwa fizyczna

W warstwie fizycznej protokołu, w celu uzyskania wysokiej niezawodności transmisji a jednocześnie prostoty implementacji i niskich kosztów wdrożenia, PRIME posługuje się adaptacyjną modulacją ortogonalną (OFDM), kodowaniem konwolucyjnym oraz przeplataniem bitów. Schemat blokowy układu nadajnika warstwy fizycznej przedstawia Rys. 2.



Rys.2. Schemat blokowy nadajnika protokołu PRIME

Pasma częstotliwości wykorzystywane w protokole PRIME obejmuje zakres 41992.1875 – 888867.1875Hz (zgodne z zaleceniem normy EN 50065) i zostało podzielone na 97 kanałów transmisyjnych (96 wykorzystywane jest do transmisji danych, w jednym transmitowana jest częstotliwość odniesienia – pilot), z odstępem międzykanałowym równym 488.28125Hz. Kodowanie konwolucyjne jest opcjonalne i może zostać wyłączone z poziomu aplikacji użytkownika. Jeśli jest włączone, wykorzystywany jest prosty (nie-rekursywny, nie-systematyczny) koder splotowy o sprawności 1/2 i długości $k=7$. Po zakodowaniu dane poddawane są przeplotowi (wykorzystywane są trzy różne scenariusze przeplotu). Niezależnie od kodowania dane poddawane są zawsze procesowi skramblowania (randomizacji strumienia bitowego), w celu wyeliminowania sekwencji jednakowych bitów (ma to istotne znaczenie w zmniejszeniu maksymalnej mocy sygnału na wyjściu modulatora).[4]

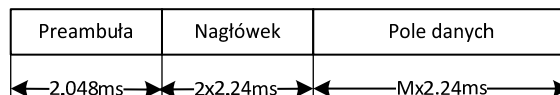
Charakterystyczną cechą transmisji danych w liniach energetycznych jest różnorodność parametrów charakteryzujących każdą linię transmisyjną (różne charakterystyki amplitudowe i fazowe odpowiedzi impulsowej). PRIME stara się zoptymalizować proces transmisji, stosując adaptację procedur modulacji do bieżących warunków transmisji. W drodze eksperymentów z różnymi technikami modulacji wyselekcjonowano trzy, których parametry pozwalają na bezpieczne wykorzystanie w transmisjach po liniach energetycznych. Wszystkie trzy wykorzystują mechanizmy różnicowe, które okazały się efektywniejsze niż zwykłe modulacje. Parametry modulacji przedstawia Tabela 1.

Tabela 1. Parametry warstwy fizycznej protokołu PRIME

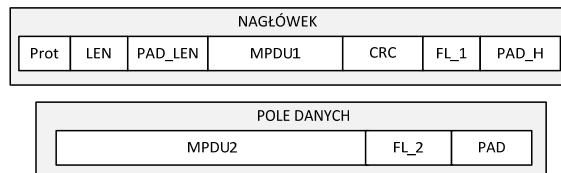
	DBPSK		DQPSK		D8PSK	
	On	Off	On	Off	On	Off
Kodowanie konwolucyjne	On	Off	On	Off	On	Off
Liczba bitów w podpaśmie	0.5	1	1	2	1.5	3
Liczba bitów w symbolu OFDM	48	96	96	192	144	288
Prędkość bitowa transmisji (kbps)	21.4	42.9	42.9	85.7	64.3	128.6

Każda transmisja rozpoczyna się od preambuły (niekodowanej), po niej transmitowana jest ramka, na którą składają się: część nagłówkowa i pole danych (Rys. 3).

Bezpośrednio po preambule transmitowane są dwa symbole OFDM (każdy kodowany na 84 podnośnych), przenoszące informację o 13 częstotliwościach pilotowych. Format ramki przedstawiony został na Rys. 4.



Rys.3. Struktura ramki warstwy fizycznej protokołu PRIME



Rys.4. Format nagłówka i pola danych ramki warstwy fizycznej

Nagłówek rozpoczyna pole protokołu (*Prot*), w którym zawarta jest informacja o wykorzystywanym mechanizmie kodowania i modulacji. Warto nadmienić, iż mechanizmy kodowania adaptowane są dynamicznie do aktualnego stanu kanału transmisyjnego (opisywanego przez poziom stopy błędów). Pole długości (*LEN*) zawiera informację o liczbie symboli OFDM transmitowanych w ramce (maksymalnie wynosić ona może 63 symbole). *PAD_LEN* informuje o długości pola *PAD*, wykorzystywanego do uzupełnienia ramki, jeśli ostatni kodowany symbol OFDM jest niepełny. W polu *MPDU* transmitowana jest pierwsza część danych. Nagłówek uzupełnia suma kontrolna nagłówka, liczona przy wykorzystaniu algorytmu wielomianowego (*CRC*), pole *FL_1* zawierające bity wykorzystywane przy dekodowaniu splotowym oraz pole *PAD_H* będące uzupełnieniem nagłówka o sekwencję bitów niezbędną dla poprawnego zakodowania w symbolu OFDM. Pole danych, poza samymi danymi użytkownika (*MSDU*) zawiera bity *FL_2* wykorzystywane przy dekodowaniu konwolucyjnym oraz bity uzupełnienia (*PAD*).[5]

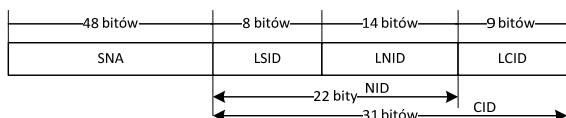
Warstwa MAC

W warstwie drugiej zdefiniowane zostały zasady komunikacji bezpośredniej pomiędzy urządzeniami sieci. Każdy z węzłów rozpoznawany jest przez unikalny 48 bitowy adres fizyczny (MAC). Adres ten jest jednakże wykorzystywany wyłącznie podczas procesu rejestracji węzła w sieci. W trakcie procesu rejestracji węzeł przyłączony otrzymuje od węzła bazowego 14 bitowy identyfikator (ang. *Local Node Identifier – LNID*), który wykorzystywany jest do komunikacji gdy węzeł pracuje w trybie terminala. Węzłom pracującym w trybie przełącznika zostaje nadany (przez węzeł bazowy) dodatkowy 8 bitowy identyfikator switcha (*SID*).

Ponieważ w każdej sieci występuje jeden węzeł bazowy, jego adres MAC jest jednocześnie identyfikatorem danej podsieci (ang. *Subnetwork Address – SNA*).

Ponadto po ustanowieniu połączenia, ustalany jest jego 9 bitowy identyfikator (ang. *Local Connection Identifier – LCID*). Strukturę systemu adresowania przedstawia Rys. 5.

Połączenie identyfikatorów *SID* i *LNID* jednoznacznie identyfikuje węzeł w strukturze podsieci (a właściwie węzeł i przełącznik pośredniczący w transmisji, czyli ścieżkę dostępu do węzła bazowego), podobnie jak kombinacja *SID+LNID+LCID* identyfikuje sesję komunikacyjną węzła bazowego i serwisowego. W sieci wykorzystywane są ponadto adresowanie grupowe i rozgłoszeniowe.



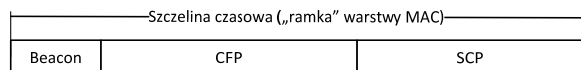
Rys.5. Adresowanie w protokole PRIME

Do każdego węzła serwisowego przypisany jest zdefiniowany poziom w topologii sieci. Poziom zerowy zarezerwowany jest dla urządzeń komunikujących się bezpośrednio z węzłem bazowym, poziom 1 dla węzłów które komunikują się z węzłem bazowym za pośrednictwem jednego przełącznika itd.

Węzeł bazowy odpowiedzialny jest za ukonstytuowanie struktury sieciowej oraz nadzorowanie poprawności jej pracy. Do jego zadań należą:

- realizacja transmisji rozgłoszeniowych, do których należy przede wszystkim rozgłaszanie ramki *Beacon*,
- zarządzanie procesami zmiany trybu pracy węzłów serwisowych (z terminala na przełącznik i odwrotnie),
- przeprowadzanie procesu rejestracji nowych węzłów serwisowych,
- zarządzanie dostępem do kanału transmisyjnego,
- dystrybucja sekwencji kodującej dla procesu szyfrowania,
- zarządzanie grupami multicast.

Proces transmisji danych w protokole PRIME realizowany jest w inicjujących ramkach *Beacon* szczelinach czasowych (Rys. 6). *Beacon* generowany jest przez węzeł bazowy i rozsyłany rozgłoszeniowo do wszystkich węzłów serwisowych w sieci. Po jego odebraniu stacje mogą przystąpić do rywalizacji o dostęp do kanału transmisyjnego (zgodnie z mechanizmem CSMA/CA) w okresie SCP (ang. *Shared Contention Period*), w którym wszystkie węzły mają równe prawo do nadawania. Po okresie SCP może (ale nie musi) wystąpić okres CFP (ang. *Contention Free Period*) w którym nadawać może wyłącznie jeden węzeł serwisowy, pod warunkiem, że we wcześniejszych ramach zarezerwował w węzle bazowym prawo do transmisji bezkolizyjnej. Informacje o długości poszczególnych okresów transmisyjnych przekazywane są do wszystkich węzłów sieci w ramce *Beacon*.



Rys. 6. Struktura szczeliny czasowej w warstwie MAC

Struktura sieci PRIME jest strukturą drzewiastą, transmisja pomiędzy węzłem serwisowym a węzłem bazowym może być realizowana za pośrednictwem węzłów pośredniczących – przełączników. Każdy z nich poza przekazywaniem danych z/do węzłów serwisowych realizuje ponadto dodatkowe funkcje utrzymaniowe, polegające na cyklicznym rozsyłaniu ramek *Beacon* w celu zainicjowania procesu rejestracji węzłów oczekujących na przyłączenie, zapewnienia synchronizacji węzłom już przyłączonym oraz transmisji informacji kontrolno-sterujących do węzłów.

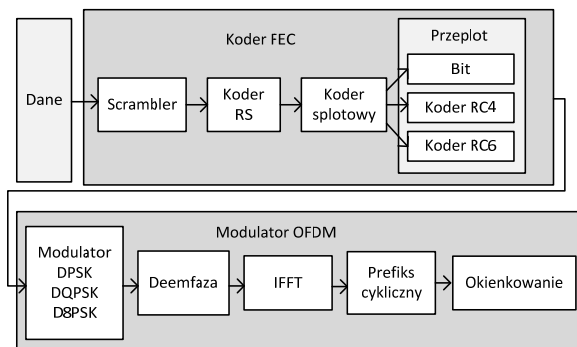
Protokół oferuje również możliwość retransmisji utraconych ramek. Nie jest to wymagane obligatoryjnie ale w węzłach może zostać zaimplementowany mechanizm selektywnego powtarzania (ang. *Selective Repeat ARQ*). W warstwie danych wykorzystywane są ramki różnego formatu, zależnego od ich przeznaczenia. Należą do nich:

- ramka ogólnego przeznaczenia (ang. *Generic MAC PDU*) – wykorzystywana zarówno do transmisji kontrolnych jak i transmisji danych; może składać się z pojedynczego nagłówka i sekwencji pakietów (agregacja),

- ramka *Beacon* - inicjująca każdą szczelinę transmisyjną,
- ramka „promująca” (ang. *promotion*) – generowana przez węzeł serwisowy w trybie rozgłoszeniowym, w momencie gdy utraci synchronizację z siecią (nie odbierze w określonym interwale czasowym ramki *Beacon*). [5][9][10]

Protokół G3-PLC

Standard G3-PLC podobnie jak protokół PRIME definiuje zalecenia dotyczące implementacji warstw: fizycznej, MAC i konwergencji. Ponadto, ponieważ należy do grupy protokołów wykorzystywanych przy zdalnym odczycie liczników energii, musi spełniać również dyrektywy zawarte w normie CENELEC A. Schemat blokowy układu nadajnika protokołu G3-PLC przedstawia Rys. 7. [6]



Rys.7. Struktura warstwy fizycznej protokołu G3-PLC

Warstwa fizyczna

W warstwie fizycznej protokołu implementowane są dwa bloki funkcjonalne:

- Koder FEC – obejmujący kilkietapowe kodowanie nadmiarowe zabezpieczające transmitowane dane,
- Modulator OFDM – który wykorzystując różne mechanizmy kodowania kanałowego, realizuje proces modulacji ortogonalnej nadawanego sygnału.

Proces kodowanie nadmiarowego rozpoczyna się od operacji skramblowania (randomizacji) strumienia bitowego, pozwalającej nadać sekwencji transmisyjnej pseudolosowy charakter, eliminujący ciągi jednakowych symboli w strumieniu danych. Dane kodowane są następnie przy wykorzystaniu kolejno:

- kodera Reed-Solomona - koder systematyczny wykorzystujący pole Galiosia ($GF=28$), o całkowitej liczbie transmitowanych symboli $N=255$ i zróżnicowanej w zależności od trybu pracy liczbie symboli danych K i symboli korekcyjnych T ($K=239$, $T=8$ dla trybu normalnego; $K=247$, $T=4$ dla trybu 'robust').
- kodera splotowego (identyczny jak w poprzednio omawianym protokole PRIME).

Przed operacją przeplotu część danych poddawana jest dodatkowemu procesowi kodowania, zależnemu od trybu pracy:

- w trybie stabilnym ('robust') – bity pola danych ramki powielane są czterokrotnie,
- w trybie super stabilnym ('super robust') - bity kontrolne nagłówka ramki powielane są sześciokrotnie.

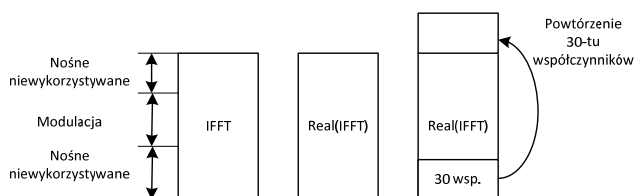
W protokole wykorzystywany jest przeplot blokowy, zaprojektowany tak, aby stanowić ochronę zarówno przed zakłóceniami impulsowymi, uszkadzającymi pojedyncze symbole OFDM jak również „zanikaniem częstotliwości” powodującym uszkodzenie dużej sekwencji symboli.

Proces modulacji OFDM jest kilkietapowy. Pierwszą operacją jest mapowanie. Dla każdej nośnej dane modulowane są za pomocą modulacji DBPSK, DQPSK lub D8PSK. W procesie modulacji wykorzystywane są ponadto informacje o możliwościach transmisji w każdym z sub-

kanałów częstotliwościowych, dostarczane z warstwy MAC. Definiują one zakres i liczbę częstotliwości nośnych wykorzystywanych w systemie - statyczne parametry kanałów transmisyjnych (ang. *Tone Map*) oraz parametry adaptacyjne (ang. *Tone Mask*), definiujące które nośne wykorzystane mają być na potrzeby danej komunikacji między dwoma modemami. Dzięki temu można np. wyłączyć z transmisji kanały, w których występują głębokie zaniki sygnału.

Po zmodulowaniu, dane poddawane są preemfazie, realizującej kształtowanie sygnału w dziedzinie częstotliwości, za pomocą rzeczywistego filtra (128 adaptacyjnie określonych współczynników). Ma to zapewnić kompensację tłumienia sygnału podczas transmisji przez linię elektroenergetyczną.

Sygnał wyjściowy z modulatora OFDM generowany jest za pomocą 256-punktowej odwrotnej transformaty Fouriera (ang. *Inverse Fast Fourier Transform - IFFT*). Generowany jest na bazie części rzeczywistej obliczonych współczynników transformacji, uzupełnionych 30 bitami prefiksu cyklicznego (ostatnie 30 wartości współczynników IFFT jest kopiowane i umieszczane na początku symbolu) (Rys. 8).



Rys.8. Mechanizm wyznaczania współczynników transformacji IFFT

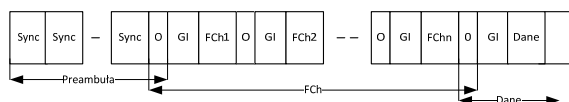
Ostatnim procesem realizowanym w bloku modulatora jest okienkowanie. W celu zminimalizowania emisji zewnętrznej i zmniejszenia amplitudy prążków bocznych każdy symbol OFDM kształtowany jest za pomocą funkcji okienkowej (ang. *Raised Cosine Window*).

W zależności od typu modulacji możliwe jest uzyskanie różnych przepustowości systemu. Tabela 2 zawiera zebrane informacje dotyczące parametrów wersji fizycznej protokołu.[7]

Tabela 2. Prędkości transmisji danych protokołu G3-PLC

Liczba symboli OFDM	DBPSK	DQPSK	D8PSK
12	4,6	13,5	23,2
20	8,6	20,6	33,7
32	12,3	27,3	43,5
40	14,0	30,4	-
52	15,9	33,9	-
56	16,4	34,7	-
112	20,4	-	-

Transmitowane dane formowane są w ramki warstwy fizycznej, których strukturę pokazano na Rys. 9.



Rys. 9. Struktura ramki warstwy fizycznej protokołu G3-PLC

Każda ramka rozpoczyna się od preambuły, wykorzystywanej do synchronizacji urządzeń oraz dopasowania poziomu wzmocnienia sygnału (ang. *Automatic Gain Control*). Kolejno transmitowane są sekwencje informacyjne FChn (ang. *Frame Control Header*), zawierające informacje niezbędne w procesie demodulacji ramki (dla każdej nośnej oddzielnie), przedzielone sekwencjami ochronnymi (ang. *Guard Interval - GI*) zawierającymi prefiks cykliczny.

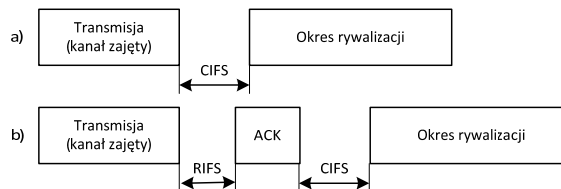
Warstwa MAC

Specyfikacja warstwy MAC dla protokołu G3-PLC oparta jest na zaleceniach zawartych w standardzie IEEE 802.15.4-2006, zdefiniowanych dla bezprzewodowych sieci personalnych (ang. *Wireless Personal Area Networks - WPAN*). Standard ten zakłada możliwość transmisji danych w dwóch trybach: bez rywalizacji, w dedykowanych szczelinach czasowych inicjowanych przesłaniem ramki *Beacon* oraz rywalizacyjnym, w którym stacje we wspólnym okresie czasu rywalizują o prawo transmisji. W protokole G3-PLC wykorzystywany jest wyłącznie rywalizacyjny tryb transmisji danych, w szczególnych przypadkach (wyszukiwania węzłów sąsiednich), na żądanie rozsyłana jest ramka *Beacon*, traktowana w tym przypadku jak ramka informacyjna, dostarczająca informacji o identyfikatorze sieci, adresie koordynatora sieci itp.

Najprostsza sieć ma strukturę gwiazdy (ang. *star topology*), w której centralnym elementem jest urządzenie koordynujące (ang. *coordinator*), zarządzające pracą sieci i nadzorujące proces dołączania/odłączania nowych urządzeń. W bardziej złożonych strukturach sieć ma topologię drzewa (ang. *star tree*). Poza węzłem koordynującym i urządzeniami końcowymi występują wtedy w niej również rutery realizujące proces retransmisji danych.

Urządzenia mogą transmitować dane w trybie z potwierdzeniami lub bez potwierdzeń. Jeśli wybrany jest tryb transmisji z potwierdzeniami urządzenie odbiorcze zobowiązane jest do wysłania specjalnej ramki pozytywnego potwierdzenia (*ACK*) jeśli odebrało poprawne dane lub potwierdzenia negatywnego (*NACK*), w momencie gdy odebrało dane ale były one uszkodzone.

Metoda dostępu do kanału bazuje na mechanizmie CSMA/CA (ang. *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) z wykorzystaniem losowego opóźnienia transmisji (ang. *Back-off*), minimalizującym prawdopodobieństwo kolizji pomiędzy wytransmitowanymi w tym samym okresie czasu ramkami. Węzeł przed rozpoczęciem transmisji sprawdza stan zajętości kanału. Jeśli kanał jest zajęty (trwa transmisja), czeka na jego zwolnienie. Rywalizacja o prawo do transmisji rozpoczyna się po wykryciu zwolnienia kanału i upływie zdefiniowanego w protokole interwału czasowego (ang. *Contention Inter-Frame Space - CIFS*). Węzeł losuje czas opóźnienia i sprawdza czy przed jego upływem jakiś inny węzeł nie rozpoczął transmisji. Jeśli nie, rozpoczyna nadawanie. W celu zapewnienia natychmiastowego dostarczenia potwierdzeń (w trybie transmisji z potwierdzeniami) węzeł, który odebrał dane (odbiorca) wysyła potwierdzenie po czasie RIFS (ang. *Response Inter-Frame Space*), krótszym od CIFS. Mechanizmy dostępu do kanału przedstawiono na Rys. 10.



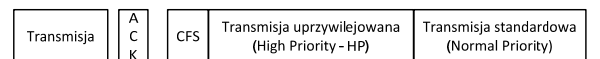
Rys.10. Proces transmisji w sieci G3-PLC:

a) w trybie bez potwierdzeń; b) z potwierdzeniami

Dodatkowo w protokole wprowadzono system priorytetyzacji, pozwalający na transmisję danych w trybie uprzywilejowanym (Rys. 11). Okno transmisyjne podzielone zostało na trzy części:

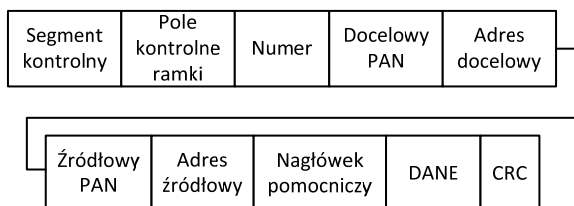
- bez rywalizacji (ang. *Contention Free Slot*), w którym stacja przesyłająca dane w trybie uprzywilejowanym we wcześniejszej ramce, wysyła drugą ich część
- dla transmisji z wysokim priorytetem (ang. *High Priority*),
- dla transmisji standardowych (ang. *Normal Priority*).

Urządzenia nadające w trybie uprzywilejowanym rywalizują o prawo transmisji (z wykorzystaniem standardowego algorytmu back-off) po skończeniu czasu CFP, pozostałe rozpoczynają proces rywalizacji dopiero po zakończeniu okresu uprzywilejowanego.



Rys.11. System priorytetów protokołu G3-PLC

Urządzenia przesyłają ramki przy wykorzystaniu 64 bitowego adresu rozszerzonego (ang. *Extended Address*), który jest rozszerzeniem unikatowego 48 bitowego identyfikatora urządzenia (*EUI-48*), nadanego przez producenta lub krótkiego 16 bitowego, który może być nadany przez operatora. Dane formowane są w ramki, których format przedstawia Rys. 12.



Rys.12. Ramka MAC protokołu G3-PLC

Ramkę rozpoczyna segment kontrolny zawierający informacje o priorytecie oraz dane kontrolne dla warstwy fizycznej (żądanie parametrów Tone Map). W polu kontrolnym ramki przesyłana jest informacja o jej typie (dane, żądanie Beacon'a, Tone Map). Numer zawiera kolejny numer sekwencyjny, wykorzystywany przy składaniu dłuższych wiadomości oraz w procedurach potwierżeń. Identyfikator PAN i adres jednoznacznie identyfikują węzeł docelowy i źródłowy. Nagłówek pomocniczy zawiera dane wykorzystywane w procesie szyfrowania. Ramka zabezpieczona jest wielomianową sumą kontrolną CRC. [6—10]

Protokół OSGP

OSGP (ang. *Open Smart Grid Protocol*) należy do grupy protokołów otwartych, definiujących mechanizmy pozwalające na implementację nie tylko procesów zdalnego odczytu wskazań liczników energii elektrycznej (ang. *Smart Metering*) ale również stworzenie całej gamy innych multi-aplikacji przeznaczonych dla infrastruktury Smart Grid. Z założenia standard w zupełnie inny sposób niż poprzednio omawiane protokoły podchodzi do definicji "inteligentnego opomiarowania", zakładając, że nie chodzi w nim wyłącznie o odczyt liczników energii. Smart Grid to infrastruktura energetyczna, która może zawierać tysiące urządzeń i systemów, komunikujących się ze sobą i wykorzystujących w różnorodnych celach wskazania liczników energii. Inteligentny system wspierający zarządzanie siecią energetyczną, oferujący szczegółowe informacje o użytkowniku, zapotrzebowaniu na energię, czy jej zużyciu ma pozwolić na precyzyjne zarządzania zasobami energetycznymi całej infrastruktury, minimalizując np. skutki awarii czy równoważąc obciążenie źródeł energetycznych. Z tego powodu standard bardzo rozlegle i szczegółowo definiuje najnowocześniejsze mechanizmy wsparcia dla warstwy aplikacji, systemów zarządzania czy bezpieczeństwa transmisji. Procedury i zasady realizacji transmisji bezpośredniej (warstwy I i II) są znacznie mniej rozbudowane, zakładając zdefiniowanie podstawowych założeń i stawiając na elastyczność protokołu warstw wyższych, który powinien działać niezależnie od wyboru protokołu warstwy fizycznej i MAC.

Założenia standardu w zakresie realizacji transmisji po liniach energetycznych bazują na wieloletnich doświadczeniach firmy Echelon (przede wszystkim w zakresie automatyki domowej). W warstwie MAC protokół opiera się na niezależnej od medium transmisyjnego normie ISO/IEC 14908. W warstwie fizycznej w chwili obecnej bazuje na normie ETSI TS103908 opracowanej dla potrzeb transmisji „użytkownika” (czyli w pasmach CENELEC B,C,D) i zaadaptowanej do pasma przeznaczonego dla inteligentnych systemów pomiarowych (CENELEC A). [11]

Warstwa fizyczna

W odróżnieniu od poprzednio przedstawianych standardów protokołów OSGP (w obecnej chwili) wykorzystuje do transmisji w warstwie fizycznej znacznie prostszą metodę modulacji. Dane kodowane są wstępnie przy wykorzystaniu opatentowanego algorytmu kodowania nadmiarowego, charakteryzującego się wysoką efektywnością eliminacji skutków zakłóceń impulsowych, a jednocześnie niewielką nadmiarowością (maksymalnie 30% bitów nadmiarowych), zwiększającą efektywną prędkość transmisji danych użytkowych (ang. *Low-Overhead FEC*). W procesie kodowania wykorzystywane są zaawansowane algorytmy cyfrowego przetwarzania sygnałów, redukcji szumów i korekcji zniekształceń. Dzięki nim system charakteryzuje się wysoką odpornością na zakłócenia impulsowe i ciągłe oraz zniekształcenia fazowe.

W procesie bezpośredniej transmisji dane kodowane są wstępnie koderem NRZ (ang. *Non-Return to Zero*) a następnie modulowane przy wykorzystaniu modulacji BPSK i nadawane na jednej z dwóch częstotliwości nośnych:

- podstawowej, dla której $f_n=86\text{kHz}$,
- dodatkowej o $f_n=75\text{kHz}$.

Jeśli transmisja przebiega w sposób niezakłócony (np. w trybie z potwierzzeniami odbierane są poprawne ramki ACK) wykorzystywana jest wyłącznie częstotliwość podstawowa. Jeśli dane nie zostaną dostarczone poprawnie możliwe jest wykorzystanie częstotliwości dodatkowej. Standard ogranicza liczbę powtórzeń do trzech (czyli w sumie urządzenie może czterokrotnie próbować nadać ramkę), przy czym pierwsza retransmisja powinna zostać przeprowadzona z wykorzystaniem częstotliwości podstawowej a dopiero ostatnie dwie przy wykorzystaniu częstotliwości dodatkowej.

Osiągana prędkość bitowa transmisji wynosi 3,24kbps, co przy uwzględnieniu narzutu protokołowego pozwala na uzyskanie efektywnej prędkości transmisji danych (użytkownika) równej 2,36kbps (około 15ramek/sekundę). [11][12].

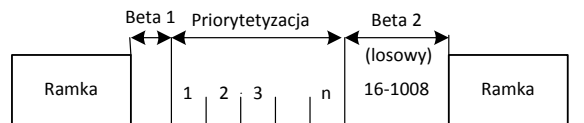
Warstwa MAC

W warstwie MAC protokół OSGP wykorzystuje mechanizmy zdefiniowane w protokole LonWorks, który posługuje się algorytmem CSMA z dostępem do kanału transmisyjnego z naleganiem typu p (ang. *p-persistent CSMA*). Urządzenie transmisyjne, które wykryło zakończenie wcześniejszej transmisji, rozpoczyna nadawanie po losowo wybranym przedziale czasu, co zmniejsza liczbę kolizji w systemie (Rys. 13). W protokole wykorzystuje się co najmniej 16 różnych czasów opóźnień (*Beta 2*). Liczba wykorzystywanych w procesie randomizacji wartości *Beta 2* jest dynamicznie dopasowywana do aktualnych parametrów linii transmisyjnej (może zmieniać się w zakresie 16-1008), dzięki temu minimalizowane są opóźnienia procesu transmisji danych.

W celu zapewnienia minimalnego odstępu międzyramkowego (ang. *Inter Frame Gap – IFG*) dla każdej sieci definiowany jest odcinek czasu *Beta 1*, którego wartość zależna jest od liczby węzłów i rozpiętości sieci.

Protokół zakłada ponadto możliwość wprowadzenia systemu priorytetów (poziom priorytetu wybierany jest z

zakresu 0-127). Jeśli urządzenie ma przydzielony niezerowy priorytet może (ale nie musi) rozpocząć transmisję bez procedury pseudolosowego opóźnienia, w przydzielonym slotcie czasowym.



Rys.13. Mechanizm dostępu do kanału w protokole OSGP

Dane transmitowane są do indywidualnego odbiorcy, grupy urządzeń lub rozgłoszeniowo do wszystkich. Każde urządzenie posiada:

- adres fizyczny - unikatowy, 48 bitowy identyfikator przypisany przez producenta (*Neuron ID*),
- adres urządzenia – przydzielany każdemu użytkownikowi w momencie rejestracji w sieci, zawierający identyfikator domeny, identyfikator podsieci i identyfikator węzła.

Ponadto urządzenie powinno rozpoznawać i odbierać dane przesłane z wykorzystaniem adresacji rozgłoszeniowej (wszystkie urządzenia w sieci lub domenie), oraz grupowej (do 64 zgrupowanych użytkowników w jednej domenie).

Protokół umożliwi przesłanie ramek w trzech trybach:

- z potwierdzeniami – dane wysyłane są do jednego lub grupy węzłów, kolejna transmisja możliwa jest po odebraniu potwierdzenia od wszystkich adresatów,
- z powtórzeniami - ramka nie jest potwierdzana ale węzeł źródłowy w celu zwiększenia prawdopodobieństwa poprawnego dostarczenia wiadomości wywyła ją kilkakrotnie (najczęściej wykorzystywany tryb),
- bez potwierdzeń – ramka wysyłana jest raz i węzeł źródłowy nie oczekuje na potwierdzenia.

Struktura sieci może być bardzo rozbudowana. Pojedyncza domena może zawierać do 32385 urządzeń podzielonych na 256 grup, z których każda może zawierać do 64 urządzeń lub zostać podzielona na maksymalnie 255 podsieci, w każdej z nich może pracować do 127 urządzeń. [13,14]

Podsumowanie

Linie energetyczne są bardzo specyficznymi kanałami transmisyjnymi. Charakterystyka kanału i jego bieżące parametry zależą w istotny sposób od wykorzystywanego pasma częstotliwości, zmieniających się w czasie właściwości linii i typu urządzeń nadawczo/odbiorczych. Ponadto linia energetyczna jest bardzo selektywnym kanałem częstotliwościowym. Oprócz szumu tła, często występują w niej zakłócenia impulsowe (będące pochodną częstotliwości podstawowej 50Hz „sygnału” energetycznego lub pochodzące z odbiorników energii elektrycznej podłączonych do linii) oraz stosunkowo duże opóźnienia grupowe, sięgające kilkuset mikrosekund.

Aby podwyższyć odporność systemu transmisyjnego na zakłócenia, większość protokołów inteligentnego opomiarowania wykorzystuje do transmisji modulację OFDM. Dzięki zaawansowanym technikom modulacji i kodowania kanałowego możliwe jest efektywniejsze wykorzystanie ograniczonej przepustowości kanału (narzucone przez normę CENELEC A) i realizacja stabilnej i niezawodnej transmisji danych w linii elektroenergetycznej.

Główną zaletą modulacji OFDM w stosunku do systemów wykorzystujących modulację z pojedynczą nośną jest jej zdolność do realizacji procesu transmisji adaptującego się do zmiennych parametrów kanału transmisyjnego (w zmiennych warunkach zaszumienia kanału transmisyjnego). Wykorzystanie tej techniki modulacji pozwala na rozwiązanie kilku podstawowych

problemów transmisji po liniach energetycznych:

- uproszczenie procedur synchronizacji odbiornika,
- podwyższenie odporności na szумы impulsowe, wynikające z wydłużenia czasu trwania symbolu OFDM, (szum może uszkodzić jedynie część symbolu w dziedzinie czasu),
- zoptymalizowanie wykorzystania dostępnego kanału częstotliwościowego.

Protokół OSGP, nie wykorzystujący modulacji OFDM wywodzi się z systemów automatyki domowej, w których ze względu na inne pasmo transmisji oraz odmienną specyfikę toru transmisyjnego, zakłócenia wewnątrzkanalowe są znacznie mniej istotne. Fakt dostrzegania słabości wykorzystywanych obecnie technik oraz otwarcia na inne niż aktualnie stosowane mechanizmy modulacji potwierdza przyłączenie się organizacji Networked Energy Services, promującej standard OSGP, do grupy G3-PLC Alliance. Sugeruje to próbę dążenie do zmiany protokołu warstwy fizycznej i połączenie zaawansowanych mechanizmów transmisyjnych zdefiniowanych dla G3-PLC z rozbudowanymi mechanizmami warstwy aplikacyjnej protokołu OSGP.

Podziękowania

Publikacja współfinansowana ze środków przyznanych na działalność statutową Katedry Elektroniki AGH.

Autorzy: dr hab. inż. Witold Machowski¹; dr inż. Jacek Kołodziej¹; dr inż. Jacek Stępień¹, mgr inż. Adam Tarnawski²

¹AGH Akademia Górniczo-Hutnicza imienia Stanisława Staszica w Krakowie, Katedra Elektroniki, al. Adama Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; e-mail: Witold.Machowski@agh.edu.pl;

Jacek.Kolodziej@agh.edu.pl; Jacek.Stepien@agh.edu.pl;

²Zakład Systemów Komputerowych Sp. z o.o., 30-415 Kraków, ul. Wadowicka 12; e-mail: Adam.Tarnawski@zsk.krakow.pl

LITERATURA

- [1] CENELEC - EN 50065-1, "Signalling on low-voltage electrical installations in the frequency range 3kHz to 148,5kHz - part 1: general requirements, frequency bands and electromagnetic disturbances"
- [2] S. Galli and O. Logvinov, "Recent Developments in the Standardization of Power Line Communications within the IEEE," Communications Magazine, IEEE, vol. 46, no. 7, pp. 64–71, July 2008.
- [3] PRIME Alliance Technical Working Group, "Draft Specification for PowerLine Intelligent Metering Evolution (PRIME) rev. 1.4., 2014, [Online] <http://www.prime-alliance.org>
- [4] ITU-T G.9904, "Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers for PRIME networks", 2012
- [5] PRIME Project, "PRIME Technology Whitepaper PHY, MAC and Convergence layers", 2008, [Online] <http://www.prime-alliance.org>
- [6] Lower layer profile using OFDM modulation type 2, ERDF, [Online]: <http://www.erdf.fr>
- [7] PLC G3 Physical Layer Specification, ERDF, [Online]: <http://www.erdfdistribution.fr>
- [8] ITU-T G.9903, "Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers for G3-PLC networks, 2014
- [9] M. Hoch, "Comparison of PLC G3 and PRIME, IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, 2011
- [10] Z. Sadowski, "Comparison of PLC-PRIME and PLC-G3 protocols", XII International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation, ISNC 2015
- [11] ETSI GS OSG 001 V1.1.1, "Open Smart Grid Protocol (OSGP)", 2012
- [12] L. Colton, M. Ossel - OSGP Alliance, "OSGP overview", ICSG, 2014
- [13] LonTalk® Protocol Specification ver. 3.0, Echelon Corporation, [Online]: <http://www.enerlon.com>
- [14] Introduction to the LONWORKS® System ver. 1.0, Echelon Corporation, [Online]: <http://www.enerlon.com>