

## Janusz JANICZEK

KATEDRA METROLOGII ELEKTRONICZNEJ I FOTONICZNEJ POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ, ul. B. Prusa 53/55, 51-317 Wrocław

# Przesyłanie danych przez sieć energetyczną

Dr inż. Janusz JANICZEK

Docent w Katedrze Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej. Jest absolwentem Wydziału Elektroniki tej uczelni – rocznik 1979. Po ukończeniu studiów pracował w Instytucie Metrologii Elektrycznej gdzie w 1976 r. obronił pracę doktorską. Jego zainteresowania dotyczą analogowych torów pomiarowych, przetworników A/C i C/A oraz mikrokontrolerów w zastosowaniu do aparatury pomiarowo-kontrolnej.



e-mail: janusz.janiczek@pwr.wroc.pl

### Streszczenie

Artykuł dotyczy zagadnienia związanego z przesyłaniem danych poprzez sieć energetyczną. Zakłócenia występujące w sieci i jej mała impedancja oraz zmienność ich wartości w czasie powodują ograniczenia odległości, na które można przesyłać dane. Dlatego wykorzystano zmodyfikowaną metodę multi-hop, stosowaną przede wszystkim w łączności bezprzewodowej, szeregowy interfejs SEMI, opracowany dla potrzeb liczników energii elektrycznej oraz modulację ASK. Dzięki temu osiągnięto znaczną poprawę jakości przesyłania danych, co potwierdzają przedstawione w artykule wyniki badań wykonanej sieci.

**Słowa kluczowe:** transmisja danych, sieć energetyczna, modulacja ASK, interfejs SNAP.

## Data transmission by power lines

### Abstract

A possibility of using the in-building power distribution conductors as a data communications medium to form a local area network (LAN) is presented in the article. High noise levels, low impedance and severe attenuation all of which vary with time and with the frequency, make the in-building power distribution conductors a hostile medium for data signal transmission. The major contribution of this work is the use of the multi-hop method, applied in both the wireless communication and the SNAP protocol. The architecture is based on a simple master/slave, where the master is the control unit, the one who is able to send commands. The power line modem is based on TDA5051A chip. A ASK modulation was chosen because, inside the CENELEC D frequency band 140-148.5 KHz, it seems to be one of the more simple and robust modulation method for power line communication. Each node can be capable to retransmit the data signal, therefore amplitude of the signal can be amplified and send for large distance. A practical implementation of a power line communication shows the possibility to send data signal for distances 40 – 50 m.

**Keywords:** Power Line Communication, ASK modulation, SNAP protocol.

## 1. Wprowadzenie

Użycie sieci energetycznej jako medium transmisyjnego umożliwia budowę sieci wewnątrz budynku w oparciu o okablowanie, którym jest dostarczana energia elektryczna. Sieć taka jest łatwo dostępna, gdyż każde pomieszczenie w budynku posiada dostęp do sieci zasilającej. Klimatyzacja, mikrofalówka, telewizor oraz wiele innych urządzeń może być dzięki temu kontrolowanych i może się komunikować poprzez sieć energetyczną tworząc inteligentny dom. Tego typu sieć umożliwia również instalowanie w dowolnym pomieszczeniu potrzebnych tam czujników i przetworników pomiarowych, a zebrane przez nie dane można łatwo zbierać w dowolnym pomieszczeniu (inteligentny dom).

Jednak mankamentem tego rozwiązania jest to, że sieć energetyczna nie została zaprojektowana do tego celu. Efektywność przesyłania w niej danych jest mała. Impedancja, tłumienie sygnału, a przede wszystkim szumy występujące w sieci energetycznej są głównymi przeszkodami w osiągnięciu optymalnego transferu

sygnału, małych zniekształceń i otrzymania dużego stosunku wartości sygnału do szumu (SNR).

Na terenie Unii Europejskiej, warunki wykorzystania sieci energetycznej jako medium transmisyjnego (PLC - Power Line Communication), zostały określone przez standard CENELEC (norma PN-EN 50065) i są podane w tabeli 1.

Tab. 1. Częstotliwości użytkowe  
Tab. 1. Exploited frequencies

Pasma	Częstotliwość, kHz	Amplituda, V	Przeznaczenie
	3 – 9	10	Dla dostawcy energii
A	9 – 95	10	Dla dostawcy energii i licencjonowanych użytkowników
B	95 – 125	1,2	Dla odbiorców bez ograniczeń
C	125 – 140	1,2	Dla odbiorców z kontrolą dostępu
D	140 – 148,5	1,2	Dla odbiorców bez ograniczeń

Najczęściej stosowaną metodą przy przesyłaniu danych poprzez sieć energetyczną (przy szybkim przesyłaniu danych) jest metoda modulacji częstotliwości z wyszukаныmi sposobami multipleksowania oraz kontroli błędów.

## 2. Realizacja

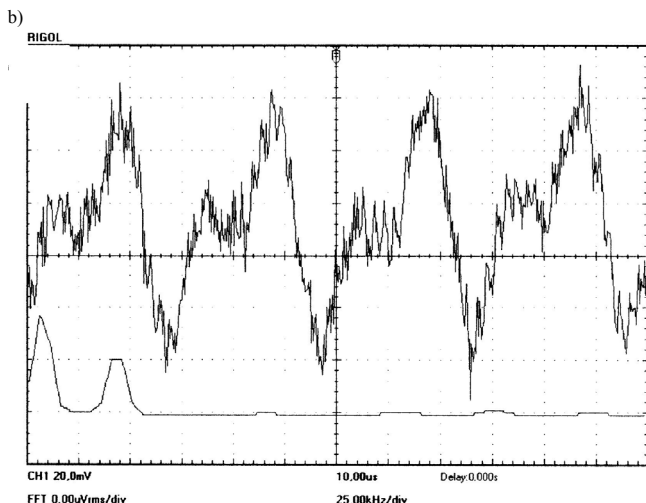
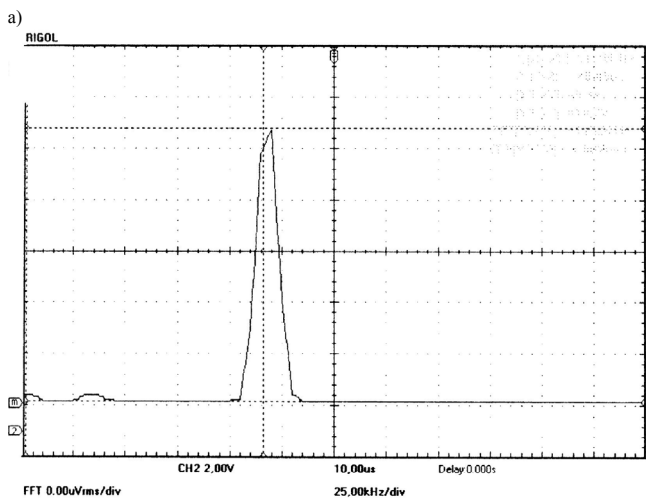
Dla zbadania właściwości sieci i jakości przesyłania danych zbudowane zostały dwa modemy z wykorzystaniem układów TDA5051A, zgodnie z ich notą aplikacyjną. Modemy pracowały w paśmie C (125 – 140 kHz) z modulacją ASK (Amplitude Shift Keying), [1], a następnie wykonano pomiary widma fali nośnej, generowanej przez modemy, na tle widma sieci energetycznej w punkcie nadawczym i odbiorczym. Nadajnik i odbiornik były oddalone od siebie o około 15 m [2]. Wyniki badań ilustrują oscylogramy przedstawione na rysunku 1.

Amplituda sygnału na wyjściu nadajnika (rys. 1a), wynosiła około 12 V, natomiast amplituda na wejściu odbiornika (rys. 1b), wynosiła zaledwie 40 mV, a więc jest znacznie mniejsza od amplitudy zakłóceń występujących w sieci energetycznej. Tak duża tłumienność sieci jest spowodowana jej niską impedancją. Bardzo duży wpływ na wartość impedancji mają pojemności filtrujące włączane równolegle na wejściach różnego rodzaju urządzeń oraz duża pojemność własna przewodów energetycznych.

Badania pokazały również, że tłumienność sieci oraz wartości występujących w niej zakłóceń zależały od dnia i godziny przeprowadzania testów. Otrzymywane wartości mogły kilkukrotnie różnić się od siebie. Badania przedstawione w pracy [3] pokazują, że zakłócenia zależą również od fazy napięcia zasilającego. Kilkrotna poprawa transmisji (zwiększenie odległości przesyłania danych) została osiągnięta poprzez wbudowanie wzmacniacza w torze odbiornika. Polepszenia jakości transmisji nie można zwiększyć poprzez zwiększenie amplitudy sygnału na wyjściu nadajnika powyżej 1,2 V, ze względu na ograniczenia wprowadzone przez normę.

Z opisanych powyżej warunków pracy wynika, że poprawna transmisja danych może być zapewniona, gdy przesyłany sygnał będzie wzmacniany co 30 – 40 m i b będzie stosowany protokół z detekcją błędów.

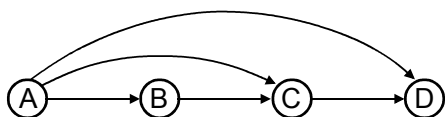
Pierwszy warunek może być zrealizowany z wykorzystaniem metody „multi-hop” stosowanej w bezprzewodowej sieci sensorowej. System ten umożliwia jednoczesną transmisję poprzez stacje pośredniczące wieloma niezależnymi ścieżkami. Umożliwia to transmisję w przypadku, kiedy odbiornik nie znajduje się w zasięgu nadajnika. Tryb ten wpływa na zwiększenie szybkości transmisji i poprawia niezawodność transmisji. W przypadku rozbudowanej mobilnej sieci bezprzewodowej, działanie sieci opisują bardziej skomplikowane algorytmy sterujące przekazywaniem danych.



Rys. 1. Amplitudy sygnałów: a) na wyjściu nadajnika, b) na wejściu odbiornika, wraz z zakłóceniami

Fig. 1. Amplitude of the signal: a) on the transmitter output, b) on the receiver input, with noise

W sieciach multi-hop nie występuje podział urządzeń ze względu na pełnione przez nie funkcje (wykonywanie aplikacji, funkcje koncentratorów, routerów i przełączników). Na rysunku 2 jest pokazany przykład takiej sieci.



Rys. 2. Konfiguracja sieci typu multi-hop

W przykładzie pokazanym na rysunku 3, węzeł retransmituje dane gdy jest spełniony warunek:

$$(a_0 > 3) \parallel (a_0 < 3) \&\& (a_n > 3) \tag{1}$$

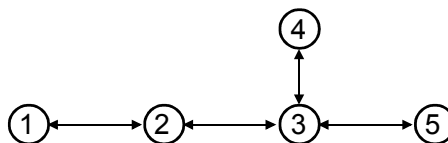
a węzeł 2 przekazuje dalej dane dla warunku:

$$(a_0 > 2) \&\& (a_n = 1) \parallel (a_0 = 1) \tag{2}$$

gdzie:  $a_0$  – adres odbiorcy  
 $a_n$  – adres nadawcy.

Jeżeli z węzła A, w sieci multi-hop, mają być przesłane dane do węzła D, to szukane jest najlepsze połączenie. Gdy nie ma bezpośredniej łączności pomiędzy węzłami A i D, dane mogą być przesłane poprzez węzły pośrednie B i C. Taki system zwiększa niezawodność pracy sieci, ale wydłuża czas przesyłania danych. Ponadto, ponieważ każdy węzeł może odbierać i wysyłać dane, należy kontrolować przesyłane dane tak, by nie krążyły bez potrzeby w sieci.

Dla potrzeb węzłów w sieci energetycznej przyjęto, że położenie węzłów jest sztywne, a każdy węzeł ma arbitralnie przydzielone reguły adresowania, na podstawie których dany węzeł podejmuje decyzję, czy przesłać przyjęte dane dalej czy też nie. Decyzja ta jest podejmowana na podstawie adresu docelowego i adresu węzła, który ostatni wysłał dane. Na rysunku 3 jest przedstawiony przykład konfiguracji sieci multi-hop przystosowanej do transmisji w sieci energetycznej.



Rys. 3. Przykładowa konfiguracja sieci z adresami węzłów

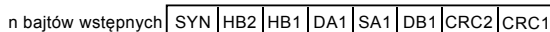
Do budowy sieci PLC typu multi-hop potrzebny jest interfejs dający możliwość podłączenia do magistrali wielu urządzeń mogących jednocześnie nią zarządzać. Takie wymagania spełnia interfejs SNAP (Scaleable Node Address Protocol) [4]. Interfejs ten jest przeznaczony dla celów automatyki domowej i może być łatwo implementowany w małych mikrokontrolerach. Jego zalety to otwarty protokół sieciowy, pozwalający na wykorzystanie do 24 znaczników, opcjonalnie można stosować sygnały potwierdzenia ACK/NAK, można stosować 8 różnych metod detekcji błędów (Checksum, CRC, FEC itp.), może być stosowany w trybach master/slave i/lub peer-to-peer, może pracować w trybie synchronicznym lub asynchronicznym niezależnie od nośnika sygnałów z wykorzystaniem połączeń typu simplex, half lub full duplex.

Komunikacja pomiędzy węzłami sieci jest realizowana w formie pakietów. Pakiety te mogą mieć różną długość. Długość pakietu zależy od liczby:

- bajtów adresu (0 – 6),
- bajtów znaczników (0 – 3),
- bajtów danych (0 – 512)
- bajtów związanych z detekcją błędów.

Wszystkie te elementy są definiowane w dwubajtowym nagłówku. Każdy pakiet może być poprzedzony opcjonalnie bajtami wstępnymi (0 – n), a sam pakiet rozpoczyna się bajtem synchronizującym (54h). Bajty wstępne nie mogą zawierać kodu bajtu synchronizującego.

Na rysunku 4 jest podana minimalna struktura pakietu SNAP.



Rys. 4. Struktura pakietu SNAP

Fig. 4. Structure of the SNAP packet

Gdzie: SYN – bajt synchronizacji  
 HB2 – bardziej znaczący bajt nagłówka,  
 HB1 – mniej znaczący bajt nagłówka,  
 DA1 – bajt adresu przeznaczenia,  
 SA1 – bajt adresu źródła,  
 DB1 – bajt danych,  
 CRC2 – bardziej znaczący bajt słowa kontrolnego,  
 CRC1 – mniej znaczący bajt słowa kontrolnego.

Pomijając bajty wstępne, pakiet zawiera osiem bajtów. Wszystkie bajty w pakiecie są ustawione tak, by bajt najmniej znaczący był z prawej strony.

Bajty nagłówkowe służą do określania całej struktury pakietu. Na rysunku 5 są przedstawione bajty nagłówkowe.

Z punktu widzenia przesyłania danych metodą multi-hop istotną jest możliwość podawania adresu przeznaczenia, co jest oczywiste, ale również adresu źródła. Tym adresem źródła jest adres nadającego aktualnie węzła, stąd każdy węzeł pośredni może podjąć decyzję o ewentualnym dalszym wysłaniu wiadomości.

bity	7	6	5	4	3	2	1	0
HB2	D	D	S	S	P	P	A	A
bity	7	6	5	4	3	2	1	0
HB1	C	E	E	E	N	N	N	N

Rys. 5. Bajty nagłówkowe  
 Fig. 5. Header bytes

Gdzie: DD – liczba bajtów adresu przeznaczenia,  
 SS – liczba bajtów adresu źródła,  
 PP – liczba bajtów znaczników protokołu,  
 AA – bity ACK/NAK (potwierdzenia),  
 C – bit trybu poleceń,  
 EEE – bity wyboru detekcji błędów,  
 NNNN – liczba bajtów danych.

Kolejnym ważnym elementem jest detekcja błędów. Układem nadzorującym pracę każdego węzła jest mikrokontroler MSP430F5418 zawierający w swej strukturze moduł kontroli CRC16, który wytwarza sygnaturę dla określonej sekwencji danych. Sygnatura ta jest oparta na poniższym wielomianie, określonym przez CRC-CCITT-BR.

$$f(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1 \quad (3)$$

Dzięki temu znacznie jest ułatwiona kontrola poprawności przesyłanych danych, a ponadto odbywa się ona w trakcie przyjmowania danych, co znacznie skraca czas potrzebny na określenie, czy transmisja przebiegła poprawnie.

Spśród różnych metod modulacji (ASK, FSK, PSK) została wybrana modulacja ASK, mimo, że pozostałe rodzaje modulacji są odporniejsze na zakłócenia. Modulacja ASK polega na zmianie amplitudy fali nośnej, najczęściej jest to jej włączanie i wyłączenie w zależności od aktualnej wartości binarnej. Jej podstawową wadą jest to, że zanik fali nośnej może być odebrany jako określona wartość bitowa.

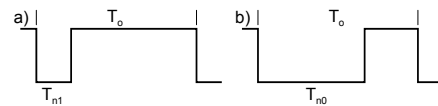
Powodem wyboru tego typu modulacji była łatwa realizacja tzw. „iloczynu na drucie”, pozwalającego na implementację arbitrażu, co daje możliwość stworzenia interfejsu służącego do budowy sieci Multi-Master.

Funkcję „iloczynu na drucie” można również uzyskać przy modulacji FSK, ale próby przeprowadzone z użyciem układu ST7537, pracującego właśnie z tą modulacją, wykazały że układ ten zachowuje się nieprzewidywalnie gdy na jego wejściu pojawią się dwa sygnały o różnych częstotliwościach, odpowiadających stanom zera i jedynki logicznej. Tego typu problemy nie występowały dla układu TDA5051A [5] pracującego z modulacją ASK.

Natomiast przy modulacji ASK może wystąpić zanik sygnału spowodowany nakładaniem się sygnałów z dwóch nadajników,

jeżeli fazy tych sygnałów są przeciwne, z tym że prawdopodobieństwo takiego zdarzenia jest znikome.

Aby sygnały przesyłane z modulacją ASK uodpornić na zakłócenia, bity 0, 1 były kodowane i wysyłane na magistralę w postaci sygnałów przedstawionych na rysunku 6.

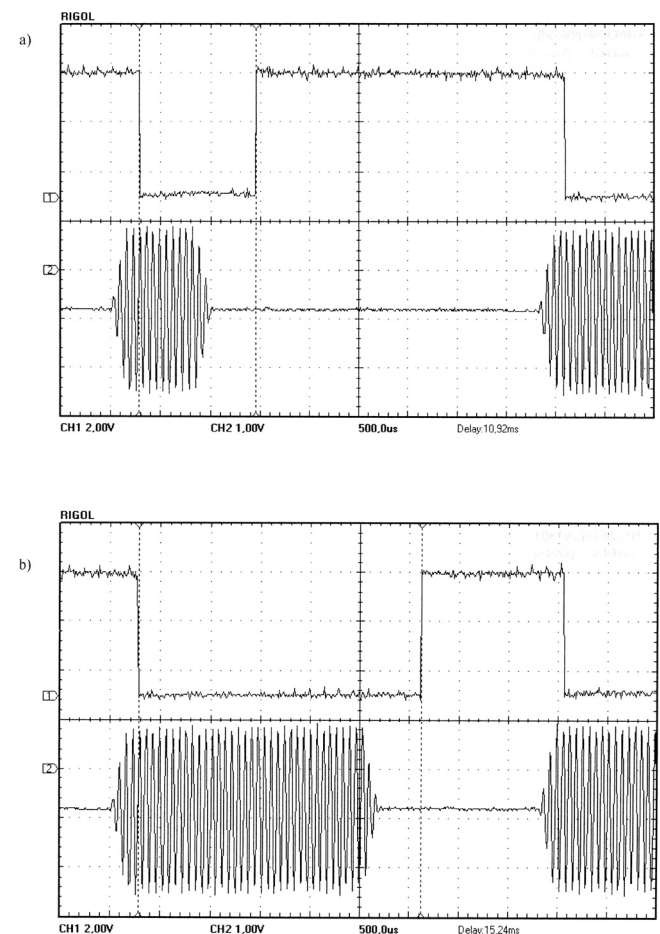


Rys. 6. Sygnały z modulacją ASK: a) bit o wartości 1, b) bit o wartości 0  
 Fig. 6. Signals with ASK modulation: a) bit with value 1, b) bit with value 0

Stosunki czasów  $T_{n1}$  i  $T_{n0}$  do okresu  $T_0$  wynoszą odpowiednio około 0,27 i 0,64. Proporcje te dla każdego bitu są kontrolowane w mikrokontrolerze. Kodowanie i odczyt stanów zerowyjedykowych odbywa się w układzie transmisji szeregowej mikrokontrolera. Dla uzyskania bitu o wartości 1 (z rysunku 6 a) nadajnik portu szeregowego wysła 3 bity z poziomem 0, łącznie z bitem startu i 8 bitów z poziomem 1, łącznie z bitem stopu. Natomiast dla otrzymania bitu o wartości 0 (rysunek 6 b) nadajnik wysła 7 bitów na poziomie 0 i 4 na poziomie 1. Podczas odbioru następuje odpowiednie sprawdzenie polegające na określeniu czasu trwania stanu 0 i 1. Wadą tego rozwiązania jest ograniczenie prędkości transmisji do 300 bodów.

### 3. Eksperyment

Uruchomione modemy zostały najpierw poddane testom, które miały pokazać jak reagują one na przesyłane sygnały.



Rys. 7. Sygnały: a) na wejściu modemu b) na wyjściu modemu  
 Fig. 7. Signals: a) on modem input b) on modem output

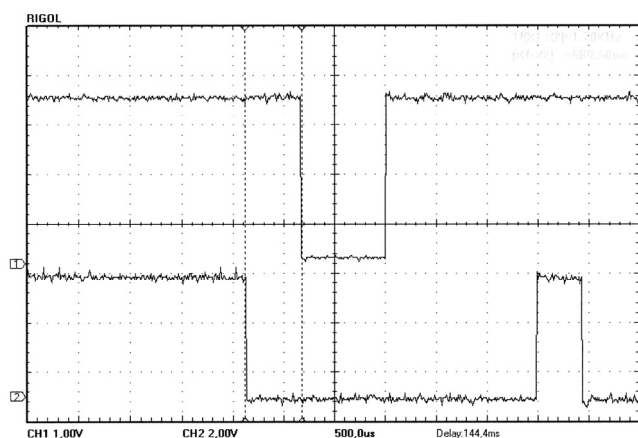
Modemy zostały umieszczone w odległości około 15 m, a prędkość transmisji wynosiła 300 bodów.

Najpierw pomierzone zostały opóźnienia pomiędzy sygnałami na wejściu i wyjściu modemu dla bitów 0 i 1. Odpowiednie oscylogramy są przedstawione na rysunku 7.

W częściach górnych rysunku 7a i 7b są zarejestrowane sygnały cyfrowe na wyjściu modemu, a w częściach dolnych sygnały zmodulowane na wejściach analogowych modemu.

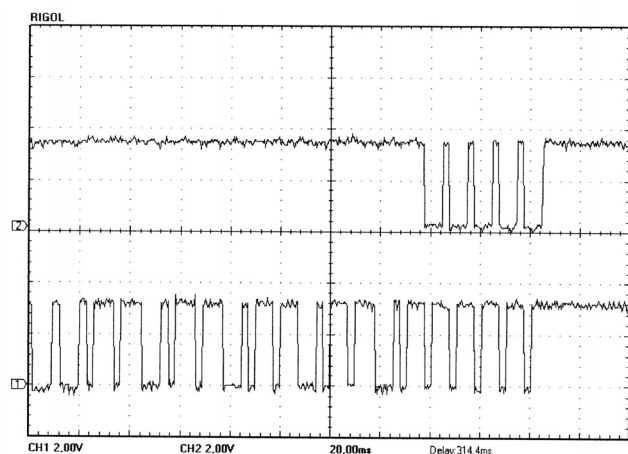
Oscylogramy pokazują, że czasy propagacji, wynikające z detekcji sygnału nośnego, częściowo się kompensują, ale przesunięcie fazowe wynosi około 250  $\mu$ s. Przesunięcie to powoduje pewne problemy w momencie arbitrażu. Wtedy wartość przesunięcia jest dużo większa, gdyż informacja o zajęciu magistrali przez którykolwiek modem dociera do pozostałych z opóźnieniem około 470  $\mu$ s.

Na rysunku 8 jest przedstawiony oscylogram, na którym pokazano moment żądania dostępu do magistrali przez dwa modemy. Arbitraż wygrywa modem wysyłający na magistralę sygnał 0 (przebieg w dolnej części rysunku).



Rys. 8. Moment arbitrażu  
Fig. 8. Moment of the arbitrage

Każda wysłana ramka wymaga potwierdzenia, że modem odbierający przyjął poprawne dane. Modem nadający, na końcu ramki wysyła pięć bitów o wartości 1, a w tym czasie modem odbierający wysyła pięć bitów o wartości 0 (rys. 9).



Rys. 9. Koniec ramki i bity potwierdzenia  
Fig. 9. End of the frame and a acknowledge bits

Na oscylogramie przebieg 1 pokazuje sygnał z modemu nadającego, a przebieg 2 – sygnał z modemu odbierającego. Modem

nadający uznaje za fakt wystąpienia potwierdzenia odebranie co najmniej jednego bitu potwierdzenia.

Przeprowadzone zostały także badania jakości przesyłania danych. Polegały one na tym, że cztery modemy były umieszczone po dwa na dwóch piętrach, w odległości około 20 m od siebie. Były one tak zaprogramowane, by co pół godziny przysyłać informacje pomiędzy skrajnymi punktami i rejestrować liczbę powtórzeń transmisji, gdy wystąpiły błędy w jej trakcie. Testy trwały przez 24 godziny.

Wyniki badań pokazały, że pomiędzy godziną 22 a 6.30 transmisja odbywała się praktycznie bez zakłóceń. Wynikało to stąd, że w tym czasie nie były włączane żadne urządzenia. Od godziny 7 do godziny 8.30 występowały pojedyncze powtórzenia transmisji, podobnie jak pomiędzy godziną 16.30 a godziną 22. Natomiast w pozostałym czasie, a więc w porze najintensywniejszego poboru mocy z sieci energetycznej, liczba powtórzeń transmisji pomiędzy najbliższymi sobie węzłami dochodziła do 4, a pomiędzy najodleglejszymi punktami - do 8.

Ponadto przeprowadzono testy mające określić maksymalną odległość, przy której daje się uzyskać połączenie. Wynikło z nich, że transmisję można jeszcze nawiązać na odległość 40 m, ale z trudnościami. Liczba powtórzeń transmisji dochodziła do 6.

#### 4. Wnioski

Przeprowadzone testy i badania wykonanych modemów w oparciu o układy TD5051A pokazały, że można nawiązać łączność do około 40 m, ale już z pewnymi trudnościami.

Zastosowane środki, mające przeciwdziałać zakłóceniom, takie jak kodowanie bitów, CRC, potwierdzanie przyjęcia poprawnej transmisji spełniły swoje zadanie i uodporniły modemy na zakłócenia, ale kosztem spowolnienia transmisji.

Zastosowanie metody multi-hop pozwoliło na zwiększenie zasięgu transmisji, ale kosztem wstawiania do sieci modemów pośrednich. Jeżeli nie są to węzły użytkowe, to podraża to koszt wykonania sieci.

Zwiększenie odległości transmisji, ze względu na ograniczenia jakie wnosi tłumienność sieci energetycznej, jest możliwe poprzez zwiększenia amplitudy przesyłanego sygnału, ale wymagałoby to zmiany normy. Należałoby również sprawdzić, jak zależy tłumienność sieci od częstotliwości. Być może przy wyższych częstotliwościach warunki transmisji byłyby lepsze.

Możliwość przesyłania sygnałów przez sieć energetyczną na niewielkie odległości pozwala na wprowadzanie elementów automatyki i sterowania w lokalach mieszkalnych i małych domach. Jednak ograniczenia z tym związane, a przede wszystkim zabezpieczenia przed zakłóceniami, powodują wzrost kosztów modemów transmisyjnych i konkurencją mogą się okazać systemy przesyłania bezprzewodowego, których cena z roku na rok maleje.

#### 5. Literatura

- [1] Szabatin J.: Podstawy teorii sygnałów. Wyd. 4, WkiL, 2002.
- [2] Kubera-Szymanowski P.: Opracowanie i badanie właściwości systemu do pomiaru poboru energii elektrycznej. Praca dyplomowa magisterska., Politechnika Wroclawska, Wrocław 2009.
- [3] Ackerman K. W.: Timed Power Line Data Communication. M. Sc. Thesis, University of Saskatchewan, 2005.
- [4] S.N.A.P. Scaleable Node Address Protocol. © 1998-2002 HTH, Document revision 1.03, [Online] Available: <http://www.hth.com/snap/>
- [5] TDA5051A. Home automation modem. Maj 1999.