

Metoda oceny jakości transmisji w sieciach niskiego napięcia wykorzystywanych do wąskopasmowej komunikacji PLC opartej na standardzie PRIME

Streszczenie. *W ślad za nowymi technikami transmisji danych zawsze podążają nowe metody testowania ich jakości. Tak jest również w przypadku nowego standardu sieci PRIME zdefiniowanego przez ITU-T i przewidzianego do realizacji usług wąskopasmowych, między innymi w sieciach niskiego napięcia. Pomiar jakości łączy transmisyjnych pozwalają na ocenę możliwości zastosowania wybranych usług telekomunikacyjnych oferowanych przez sieć oraz prognozowanie ich jakości. W zdefiniowanym w zaleceniu ITU-T G.9904 interfejsie PRIME uwzględniono pomiary dwu parametrów fizycznych odebranego sygnału, którymi są: moc odebranego sygnału oraz poziom odstępu sygnału od szumu. Oprócz pomiaru parametrów fizycznych, w zaleceniu uwzględniono również rejestrację danych statystycznych sześciu podstawowych błędów i anomalii, z których tylko dwa są użyteczne w pomiarach teletransmisyjnych, w dodatku w bardzo ograniczonym stopniu. Ograniczenie to jest konsekwencją nieuwzględnienia w zaleceniu archiwizacji długości ramek i rodzaju modulacji jako materiału statystycznego przeznaczonego do dalszej analizy jakości transmisji danych. Prezentowana w pracy metoda pozbawiona jest tych wad i pozwala na realizację pomiaru dla dowolnej długości pakietów, rodzaju modulacji i mocy sygnału. Biorąc pod uwagę ciągłe zmiany parametrów elektrycznych i transmisyjnych sieci niskiego napięcia, takich jak impedancja i zakłócenia, w metodzie uwzględniono możliwość dokonywania oceny jakości z automatycznym, naprzemiennym przełączaniem parametrów transmisyjnych nadawanego sygnału. W proponowanej metodzie dokonano analizy możliwości zastosowania różnych sygnałów testowych pozwalających na zbadanie natury błędów transmisyjnych sieci PRIME. Jako sygnał testowy wykorzystano pseudolosowe sekwencje binarne maksymalnej długości (PRBS). W pracy podjęto próbę interpretacji wyników pomiarowych zgodnie z zaleceniem ITU-T G.821. Interpretowane w ten sposób wyniki prezentowane są w odniesieniu do parametrów fizycznych łącza transmisyjnego, jakim jest sieć niskiego napięcia. Zastosowanie sygnałów PRBS jako testowych oraz realizacja pomiaru w warstwie PHY modelu warstwowego przyjętego w PRIME pozwala na realizację dodatkowych funkcji pomiarowych, takich jak np. pomiar opóźnień i ich zmienności w czasie. W pracy zaprezentowano aplikację pomiarową wykorzystywaną w badaniach i przygotowaną w języku programowania Python, czyli w dużym stopniu niezależną od stosowanych systemów operacyjnych, a jako rozwiązanie sprzętowe wykorzystano interfejs firmy ST Microelectronics. Mimo, że formalnie prezentowaną metodę należy klasyfikować jako metodę OOS (ang. out of service), to korzystając z faktu, że transmisja PLC (ang. Power Line Communication) w sieci PRIME odbywa się we wspólnym medium, możliwa jest realizacja pomiarów w systemie będącym w eksploatacji. Rezultaty pracy mogą być przydatne we wszystkich obszarach związanych z transmisją danych wykorzystującą technikę transmisji PLC, a w szczególności takich obszarach jak projektowanie, instalowanie i eksploatacja systemów zdalnego odczytu liczników zużycia energii elektrycznej.*

Keywords: Komunikacja PLC, PRIME, QoS, Smart Metering, Smart Grid

Wprowadzenie

Interfejs PRIME jest nowym ogólnosięciowym standardem wąskopasmowej techniki transmisji PLC (ang. Power Line Communication), zdefiniowanym w październiku 2012 r. w zaleceniu ITU-T G.9904 [1] i opublikowanym w marcu 2013 r. Zalecenie ITU-T G.9904 definiuje warstwę fizyczną, warstwę łącza danych oraz parametry zwielokrotnienia ortogonalnego z podziałem częstotliwości. Do transmisji danych wykorzystywane jest

pasmo A CENELEC [2] w zakresie od 42 kHz do 89 kHz. Innym standardem transmisji PLC, również przeznaczonym głównie dla potrzeb smart metering'u, (który w Polsce raczej nie zostanie przyjęty, ponieważ operatorzy preferują PRIME) jest G3, porównywany z PRIME już w roku 2011 [3], mimo że opis PRIME istniał wtedy jedynie w postaci szkicu grupy PRIME Alliance.

Parametry techniczne i charakterystyka interfejsu PRIME

Interfejs PRIME przewidziany jest do pracy w sieci niskiego napięcia, jako standard wykorzystujący do transmisji danych linie elektroenergetyczne sieci jednofazowej, trójfazowej, a nawet prądu stałego. Biorąc pod uwagę częstotliwości pasma A-CELENEC (którego podzakres wykorzystuje PRIME) można stwierdzić, że standard PRIME w obecnej wersji przewidziany jest do wykorzystania przez dostawców energii, a nie jej odbiorców. Pozostałe cechy PRIME, takie jak: architektura sieci, rozwiązania w zakresie protokołów komunikacyjnych czy model warstwowy uwzględniający warstwę konwergencji, świadczą o tym, że stanowi on niezbędną, komunikacyjną część systemu Smart Grid. Zastosowanie interfejsu w sieci elektroenergetycznej nN, która z telekomunikacyjnego punktu widzenia jest jednocześnie siecią dostępową oraz siecią „ostatniej mili” sprawia, że interfejs ten w szczególności nadaje się do nowoczesnych rozwiązań w obszarze Smart Metering [4,5]. Maksymalna przepływność z jaką można przesyłać informacje wynosi 128 kbit/s, a minimalna to ok. 21 kbit/s, są to wartości porównywalne z tymi stosowanymi w telefonii cyfrowej i wystarczające, porównując rodzaje usług w cyfrowej sieci telefonicznej z opisywaną, czyli telemetryczną. Przepływność binarna nie jest regulowana, zależy ona od wybranej modulacji. W poniższej tabeli zestawiono wartości przepływności i odpowiadające im rodzaje modulacji.

Tabela 1. Przepływności interfejsu PRIME w zależności od zastosowanej modulacji.

Przepływność	21 kbit/s	43 kbit/s	64 kbit/s	43 kbit/s	86 kbit/s	128 kbit/s
Modulacja	DBPSK z FEC	DQPSK z FEC	D8PSK z FEC	DBPSK	DQPSK	D8PSK

Jak wynika z tabeli 1, możliwa jest praca z wykorzystaniem 43 kbit/s stosując dwa rodzaje modulacji tj. DBPSK i DQPSK z włączoną funkcją korekcji błędów w przód (FEC - ang. Forward Error Correction). W wyniku prowadzonych badań można stwierdzić, że zawsze lepsze rezultaty daje zastosowanie DQPSK z FEC niż zastosowanie prostszego rodzaju modulacji tzn. DBPSK z wyłączonym FEC.

Biorąc pod uwagę zmienne warunki transmisji w sieci nN, spowodowane głównie zmienną impedancją sieci oraz zakłóceniami w niej występującymi, uwzględnienie na etapie standaryzacji różnych modulacji jest bardzo korzystne, ponieważ możliwa jest dynamiczna zmiana rodzaju modulacji. Zmiany modulacji odbywać mogą się w dowolnym momencie bez konieczności jej negocjacji, na każdym kierunku transmisji niezależnie. Dogodność taka wynika z formatu ramki i sposobu jej modulowania. Na poniższym rysunku przedstawiono format ramki PRIME.



Rys. 1. Format ramki PRIME

Preambuła, nagłówek oraz CRC kodowane są zawsze z zastosowaniem tego samego, najbardziej niezawodnego rodzaju modulacji tzn. DBPSK z włączoną funkcją FEC, zaś pole danych z zastosowaniem dowolnego rodzaju modulacji. Informacja o

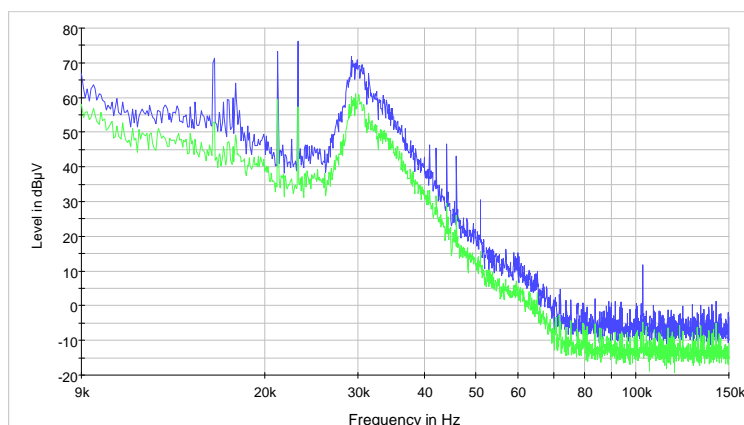
VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

sposobie modulowania pola danych zawarta jest w nagłówku ramki. Przyjęcie takiego schematu komunikacyjnego nie tylko pozwala na adaptacyjne dostosowanie systemu telemetrycznego do zmiennych warunków propagacyjnych w sieci nN, ale pozwala również na gromadzenie materiału statystycznego bez konieczności deklarowania rodzaju modulacji. Właściwość tą wykorzystano w prezentowanej metodzie oceny jakości transmisji PLC-PRIME w sieci nN.

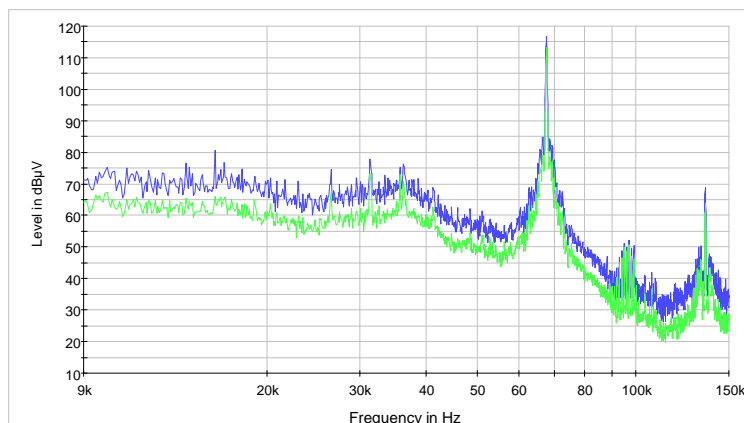
Aktualnie dostępne metody prognozowania jakości transmisji PLC w sieci niskiego napięcia

Jedyną istniejącą metodą to analiza w dziedzinie częstotliwości. Spektrometria w sieciach niskiego napięcia jest powszechnie stosowana [6]. Jako przykład możliwości zastosowania tej metody do prognozowania jakości transmisji, na poniższych ilustracjach zaprezentowano dwa spektrogramy: a) przy braku zakłóceń, b) przy obecności silnych zakłóceń wąskopasmowych.

a)



b)



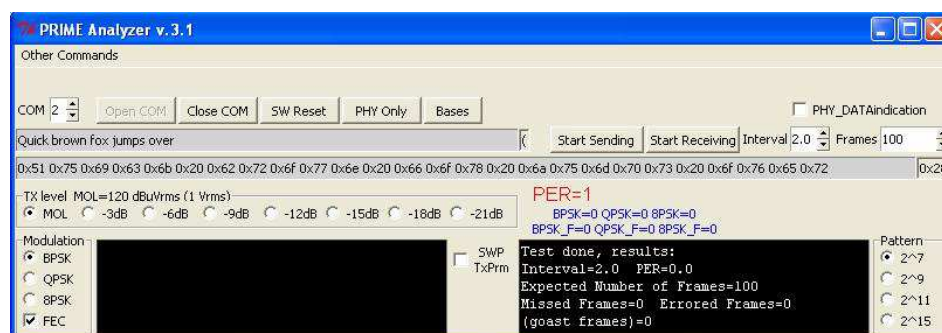
Rys. 2. Przykładowe spektrogramy obrazujące tło sygnału pomierzone w sieci niskiego napięcia:
a) przy braku zakłóceń, b) przy obecności silnych zakłóceń wąskopasmowych.

Krzywe w kolorze niebieskim reprezentują wartości maksymalne sygnału uzyskane w okresie obserwacji, zaś krzywe w kolorze zielonym to wartości uśrednione w tym samym czasie. Porównując dane przedstawione na rysunku 2 a) i b) należy zwrócić uwagę na przesunięcie o 40 dB μ V skali na osi wartości. Obecność silnych zakłóceń wąskopasmowych o charakterze jak na rysunku 2b uniemożliwia transmisję nawet na odległość kilku metrów, bez względu na rodzaj modulacji oraz czy zastosowano techniki korektę błędów w przód czy nie jej nie zastosowano. Powodem błędów transmisyjnych są zakłócenia w paśmie wykorzystywanym przez PRIME (ok. 68 kHz) o charakterze ciągłym (zielona krzywa pokrywa się z niebieską).

Uzyskane w ten sposób wyniki pomiaru są łatwe w interpretacji, jednak mają dwie zasadnicze wady: koszt analizatora spektrum oraz konieczność dokonywania czasochłonnych pomiarów w wielu punktach drogi transmisyjnej.

Proponowana metoda

Proponowana metoda jest bardzo szybka, automatyczna i wymaga dołączania aparatury pomiarowej do sieci niskiego napięcia jedynie w dwóch punktach będących zakończeniami drogi transmisyjnej. Na rysunku 3 zaprezentowano widok okna głównego aplikacji programowej przeznaczonej do współpracy z modemem PRIME.



Rys. 3. Widok okna głównego aplikacji programowej przeznaczonej do współpracy z modemem PRIME.

Z rysunku 3 można odczytać możliwe nastawy parametrów transmisyjnych oraz zastosowane rodzaje sygnałów testowych. Nastawy parametrów oraz rodzaje sygnałów testowych mogą być zmieniane automatycznie. Nie jest wymagane dokonywanie zmian na dwóch końcach drogi transmisyjnej, dzięki temu nie ma potrzeby wysyłania jakichkolwiek komend na odległy koniec. Rozwiązanie takie było możliwe dzięki: 1) wykorzystaniu cechy PRIME, jaką jest przenoszenie informacji o parametrach transmisyjnych w nagłówku ramki; 2) zastosowaniu autodetekcji rodzaju odbieranego sygnału PRBS. Autodetekcja dokonywana jest z wykorzystaniem analizy współczynników estymatora korelacji sygnału odbieranego i zestawu czterech sygnałów wzorcowych, co matematycznie opisano poniższą formułą:

$$(1) \quad K_{xy}(m) = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} x_i y_{i+m}$$

gdzie x_i – sygnał wzorcowy PRBS, y_i – odebrany, zaburzony sygnał PRBS, L – długość sekwencji PRBS sygnału wzorcowego, m – oznacza odstęp, między kolejnymi wartościami x i y .

VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

Kryterium detekcji rodzaju sygnału PRBS jest okresowość współczynników estymatora korelacji wynosząca L . W przypadku braku błędów transmisyjnych wartości K_{xy} mogą przyjąć jedną z dwu możliwych wartości: 1 albo $-1/L$. W okresie L wartość $K_{xy}=1$ występuje tylko jeden raz i nazywana jest wartością charakterystyczną. W przypadku obecności błędów transmisyjnych wartości K_{xy} należą do skończonego zbioru w zakresie od -1 do 1 , ze skokiem $1/L$. Analizie podlega tylko wartość charakterystyczna. Im wartość charakterystyczna jest mniejsza od jeden tym więcej błędów bitowych. Każdy, pojedynczy błąd bitowy występujący w okresie L pomniejsza wartość charakterystyczną o $2/L$. Podejście takie pozwala nie tylko na wyznaczenie wartości PER (ang. Packet Error Ratio), ale również na wyznaczenie estymatora BER (ang. Basic Error Ratio) z błędem estymacji tym mniejszym im większa jest długość pakietu testowego. Rozwiązanie problemu wyznaczenia estymatora BER (wraz z określeniem błędu estymacji) na podstawie PER z zastosowaniem proponowanej metody można uznać za osiągnięcie, zważywszy na istotę problemu, trudność jego rozwiązania [7,8] i korzyści praktyczne z tego wynikające.

Z punktu widzenia problematyki opisanej w [8] istotnym jest również fakt, że proponowana metoda pozwala na wyznaczenie wartości FER (ang. Frame Error Ratio), a nie jedynie jej estymacji na podstawie PER. Wyznaczenie FER niezależnie od PER w tym samym, identycznym czasie obserwacji było możliwe dzięki deklaracji dwu dodatkowych parametrów tj. interwału czasowego między kolejnymi pakietami i liczby oczekiwanych pakietów – F . Pakietowi po stronie odbiorczej nadawany jest jeden z trzech statusów: prawidłowy (EF), błędny (E) oraz zaginiony (M).

Wartość PER określa poniższa zależność:

$$(2) \quad PER = \frac{p_E + p_M}{F}$$

gdzie p_E - liczba błędnych pakietów, p_M - liczba zaginionych pakietów.

Wartość FER określa poniższa zależność:

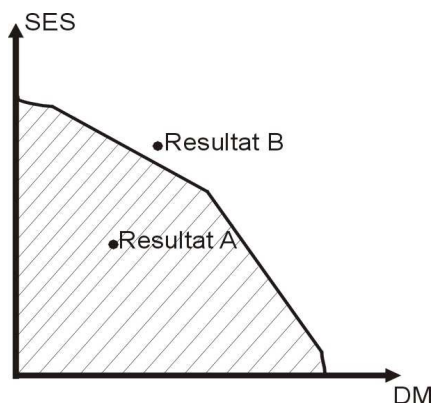
$$(3) \quad FER = \frac{F - p_{EF}}{F}$$

gdzie p_{EF} – liczba pakietów odebranych prawidłowo.

Powyższe sposoby definiowania PER i FER wynikają z organizacji ramki PRIME, gdzie CRC (ang. Cyclic Redundant Check) obliczane jest jedynie z nagłówka ramki, a pole danych nie jest zabezpieczane (rys. 1). Jeżeli wystąpił co najmniej jeden błąd bitowy w nagłówku ramki, ramka traktowana jest jako nieprawidłowa, a pakiet zaginiony. Jeżeli w nagłówku ramki nie ma błędów, a wystąpił co najmniej jeden błąd bitowy w polu danych, ramka traktowana jest jako prawidłowa, a pakiet błędny.

Uzyskane w ten sposób wyniki podlegają interpretacji zgodnie z zaleceniami ITU-T G.821 [7] oraz ITU-T G.826 [9] w zakresie: błędnych sekund (ES), sekund z poważnymi błędami (SES) oraz co istotne zdegradowanych minut (DM). Ze stosowania parametru DM (zapropozowanego w 1988 roku w zaleceniach ITU-T) w pomiarach teletransmisyjnych zrezygnowano w kolejnych wersjach zaleceń z powodu braku praktycznego zastosowania w odniesieniu do istniejących usług telekomunikacyjnych. Zdaniem autora, parametr ten wraz z SES doskonale nadaje się do określania

podatności sieci nN do transmisji danych z wykorzystaniem interfejsu PRIME. Wynik pomiaru długoterminowego powinna stanowić para wartości SES i DM. Wymagania jakościowe (stawiane sieci nN) powinna opisywać krzywa $SES=f(DM)$ taka, że $SES_{max}=f(0)$, a $f(DM_{max})=0$. Graficzny sposób interpretacji wyników zilustrowano na rysunku 4.



Rys. 4. Graficzny sposób interpretacji długoterminowych wyników pomiaru, punkt znajdujący się w obszarze zakreślonym reprezentują wyniki kwalifikujące sieć nN do realizacji usług.

Dobór kształtu krzywej zależy od rozwiązań systemowych stosowanych w sieci telemetrycznej i założonej jakości usług przez nią realizowanych. Dla przykładu z rysunku 4, zgodnie z proponowaną metodą: rezultat A kwalifikuje sieć nN do realizacji usług telemetrycznych z wymaganą jakością usług, rezultat B nie kwalifikuje.

Podsumowanie

Najważniejszym rezultatem pracy jest opracowanie metody interpretacji wyników, która polega na wyznaczeniu parametrów zbliżonych do tych zdefiniowanych w zaleceniu ITU-T G.821 już w roku 1988 i ciągle będących w użyciu [7]. Opracowana interpretacja wyników pozwala na wymierną, obiektywną i automatyczną ocenę jakości transmisji w sieciach niskiego napięcia, wykorzystywanych do komunikacji PLC opartej na standardzie PRIME. Mimo, że formalnie prezentowaną metodę należy klasyfikować jako metodę OOS (ang. out of service) [7], to korzystając z faktu, że transmisja PLC w sieci PRIME odbywa się we wspólnym medium, możliwa jest realizacja pomiarów w systemie będącym w eksploatacji

Rezultaty pracy mogą być przydatne we wszystkich obszarach związanych z transmisją danych wykorzystującą technikę PLC, a w szczególności w takich obszarach jak: projektowanie, instalowanie i eksploatacja systemów zdalnego odczytu liczników zużycia energii elektrycznej.

References

1. Recommendation ITU-T G.9904. Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers for PRIME networks, International Telecommunication Union, 2012.
2. CENELEC EN 50065-1 (2011). Signalling on low-voltage electrical installations in the frequency range 3 kHz to 148,5 kHz – Part 1: General requirements, frequency bands and electromagnetic disturbances, 2011.

VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

3. Hoch M. Comparison of PLC G3 and PRIME. Proceedings of the IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Application, 2011, pp. 165-169.
4. Kiedrowski P., Boryna B., Marciniak T. Last-mile smart grid communications based on hybrid technology as a reliable method of data acquisition and distribution. Rynek Energii № 1(104), pp. 127-132
5. Oksman V., Zhang J. G.HNEM: the new ITU-T standard on narrowband PLC technology. IEEE Communications Magazine № 12 (49), 2011, pp. 36-44
6. Wasiak I., Gburczyk P., Pawełek R. Oddziaływanie przemienników częstotliwości na jakość energii elektrycznej w układzie potrzeb własnych elektrowni. Część II - Badania symulacyjne. Przegląd Elektrotechniczny № 1, 2014, Warsaw, Poland.
7. Recommendation ITU-T G.821. Error performance of an international digital connection forming part of an integrated services digital network, International Telecommunication Union, 2012.
8. Boryna B., Dubalski B., Kiedrowski P. and Zabłudowski A. Errors Nature in Indoors Low Power 433 MHz Wireless Network, Image Processing and Communications Challenges 2 (ed. R. S. Choraś), Springer Verlag, Advances in Intelligent and Soft Computing 84, 2010, pp. 373-378;
9. Recommendation ITU-T G.826. End-to-end error performance parameters and objectives for international, constant bit-rate digital paths and connections, International Telecommunication Union, 2012.

Autor: dr inż. Piotr Kiedrowski; Zakład Teletransmisji Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. J.J. Śniadeckich w Bydgoszczy, ul. Al. Prof. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, e-mail: piotr.kiedrowski@utp.edu.pl