

Metody zwiększenia niezawodności transmisji PLC w sieciach niskiego napięcia oświetlenia drogowego i ulicznego

Streszczenie. W pracy wykazano różnice pomiędzy sposobami komunikacji w sieciach ostatniej mili systemów komunikacyjnych Smart Metering i Smart Lighting opartych na technologii PLC. Różnice te powodują, że adaptacja rozwiązań stosowanych Smart Metering do systemów Smart Lighting jest niewskazana. W pracy skupiono się nad problemami niezawodności transmisji w trójfazowych sieciach elektroenergetycznych przewidzianych do zasilania nowoczesnych systemów oświetleniowych. Zaproponowano rozwiązania sprzętowe i systemowe mające na celu poprawę niezawodności komunikacji. W pracy w wymierny sposób wykazano korzyści stosowania implementowanych od niedawna w interfejsach PLC trybów transmisji takich jak: dual channel, korekta błędów w przód oraz dynamiczny sposób zmiany rodzaju modulacji. W zakresie rozwiązań systemowych dokonano analizy i wyboru optymalnego protokołu routingu do zastosowania w sieciach komunikacyjnych ostatniej mili systemów Smart Lighting. Jako jedną z metod zwiększenia niezawodności transmisji zaproponowano zmiany konstrukcyjne w koncentratorze ruch, polegające na zastąpieniu w koncentratorze trzech modemów PLC dwoma lecz dołączonymi jednocześnie do trzech faz sieci elektroenergetycznej niskiego napięcia.

Słowa kluczowe: PLC, Smart Lighting, oświetlenie uliczne i drogowe

Wprowadzenie

Sieć niskiego napięcia stanowi wspólne medium transmisyjne podobnie jak np. Ethernet w 10Base5. Różnica pomiędzy Ethernetem a siecią energoelektryczną polega na tym, że w sieci elektroenergetycznej nie wszystkie terminale są we wzajemnym zasięgu transmisyjnym. Dlatego dla zwiększenia zasięgu komunikacji z zastosowaniem technologii PLC (Power Line Communications) stosuje się technikę transmisji multi-hop.

Technika multi-hop polega na przekazywaniu ramek danych przez węzły pośredniczące, znajdujące się na drodze transmisyjnej pomiędzy węzłem nadawczym a odbiorczym, które to znajdują się w takiej odległości, że bezpośrednia transmisja między tymi dwoma węzłami jest niemożliwa. W oświetleniu ulicznym i drogowym technologia PLC wykorzystywana jest przede wszystkim do indywidualnego sterowania lampami. Sieci nN oświetlenia ulicznego i drogowego w większości przypadków są trójfazowe, co w przypadku gdy w systemie oświetleniowym instalowana jest jedna lampa na słupie powoduje, że odległości między lampami zasilanymi z tej samej fazy są trzykrotnie większe niż odległości między słupami. Kolejną specyfiką sieci elektroenergetycznej oświetlenia ulicznego i drogowego jest jej topologia, mianowicie jest to topologia kaskadowa, a nie topologia siatki jak jest to w większości sieci PLC przeznaczonych do odczytu liczników energii elektrycznej. Zastosowanie techniki transmisji multi-hop w sieci o topologii kaskady jest szczególnie niekorzystne z dwóch powodów:

- 1) występuje duża liczba skoków czyniąc komunikację między odległymi węzłami zawodną,

- 2) zastosowanie techniki transmisji multi-path jednocześnie z techniką multi-hop w celu zwiększenia niezawodności transmisji jest mało efektywne (np. w porównaniu z sieciami o topologii siatki) ze względu na małą liczbę ścieżek alternatywnych.

Niezawodność transmisji PLC w systemach oświetlenia drogowego i ulicznego (podobnie ja w większości systemów ze zdalnym sterowaniem) ma duże znaczenie na jakość usług oferowanych przez te systemy oraz wpływa znacząco na ich możliwości, wydajność i bezpieczeństwo. W niniejszej pracy do wymiernej oceny jakości transmisji użyty zostanie parametr *PER* (ang. Packet Error Rate), a wpływ tego parametru na jakość usług opisany zostanie jako średnia wartość czasu odczytu lub zapisu danych do wszystkich lamp znajdujących się w tej samej sieci ostatniej mili. Wartość *PER* może przyjmować wartości od 0 do 1.

Zagadnienia poprawy jakości transmisji PLC w sieciach elektroenergetycznych są ciągle aktualne, istniejące opracowania w zakresie transmisji wąskopasmowej PLC w sieciach nN [1, 2] dotyczą przede wszystkim standardów przeznaczonych dla systemów Smart Metering. Opracowania te nie mogą być wykorzystane w tematyce związanej z niniejszym referatem z kilku powodów. Powodem pierwszym jest fakt, że standardy Smart Metering dotyczą transmisji danych w sieciach nN ogólnego przeznaczenia – nie dedykowanych wyłącznie do zasilania źródeł światła. Drugi powód to pasmo wykorzystywane przez systemy Smart Metering tzn. CENELEC-A [3], systemy Smart Lighting muszą być zaprojektowane do pracy co najmniej w pasmach CENELEC A i B. Konsekwencją tej cechy jest trzecia różnica pomiędzy Smart Metering, a Smart Lighting tzn. obecność na rynku modemów wykorzystujących do transmisji jedynie jedną nośną (w danej chwili) a nie wielu tak jak jest to realizowane w standardach przewidzianych dla Smart Metering.

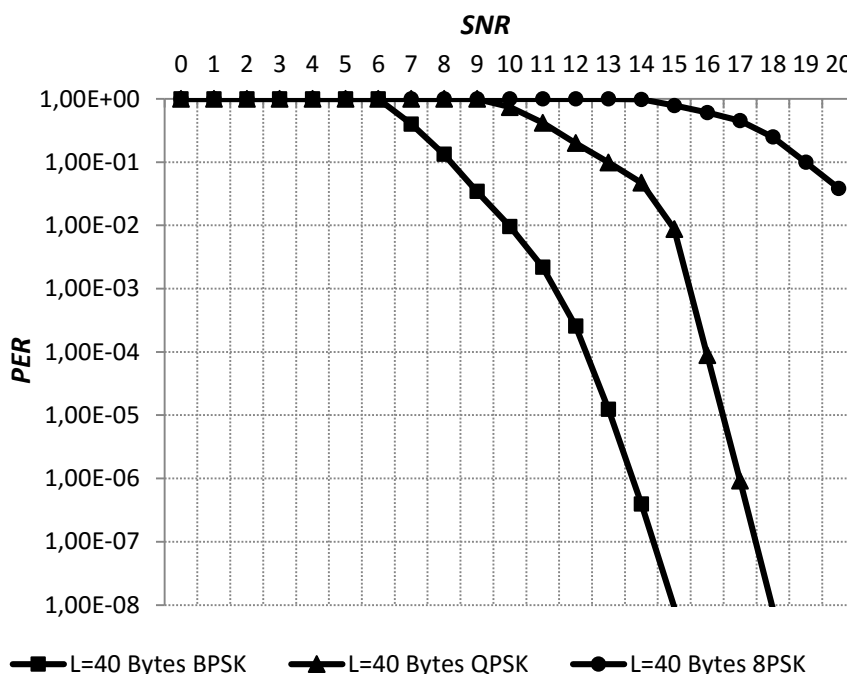
Istotnym podobieństwem w rozwiązaniach stosowanych zarówno w systemach do odczytu liczników energii elektrycznej jak i do sterowania oświetleniem ulicznym i drogowym jest praca w warunkach silnego niedopasowania impedancyjnego, które jest trudne do skorygowania w układach sprzężenia liniowego modemu z uwagi na zmienność impedancji sieci nN. Te szczególne warunki transmisyjne powodują, że zmiany jakości transmisji są procesem krótko (kilku sekundowym) jak i długoterminowym (powyżej 15 min.). Profile zużycia energii przechowywane w pamięci licznika mogą być odczytane w późniejszym terminie podobnie jak w przypadku oświetlenia harmonogramy nastaw lamp mogą być wysłane wcześniej. Rozwiązanie takie jest możliwe dzięki rozszerzonym funkcjom koncentratorów ruchu (pełniących rolę styku sieć ostatniej mili - sieć IP), mianowicie zleceń stałym. Zwiększając niezawodność transmisji PLC można zrezygnować z funkcjonalności zleceń stałych na rzecz innych np. bardziej zaawansowanych metod szyfrowania. W kolejnych sekcjach niniejszej pracy zostaną omówione metody zwiększenia niezawodności wąskopasmowej transmisji PLC z zastosowaniem jednej nośnej w sieciach nN wydzielonych do oświetlenia drogowego i ulicznego.

Dobór rodzaju modulacji oraz skuteczność korekty błędów w przód

Obecnie w wąskopasmowej transmisji PLC najczęściej mają zastosowanie dwie rodziny modulacji tj. FSK (ang. Frequency Shift Keying) oraz PSK (ang. Phase Shift Keying). Możliwość konfiguracji nowoczesnych modemów do pracy z wykorzystaniem modulacji FSK jest obecnie stosowana jedynie celem zapewnienia kompatybilności wstecz tzn. realizacji komunikacji z modemami starszego typu, nie obsługującymi modulacji PSK. Najczęstszymi rodzajami modulacji rodziny PSK są BPSK (ang. Binary PSK), QPSK (ang. Quadrature PSK) oraz 8PSK (8 fazowa PSK). Dobór modulacji jest kompromisem pomiędzy szybkością transmisji, a niezawodnością transmisji. Zakładając, że przepływność binarna wynosi p dla modulacji BPSK to dla modulacji QPSK wynosi

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

ona 2p, a modulacji 8PSK 3p. Do opisu niezawodność transmisji z wykorzystaniem ww. modulacji można użyć charakterystyk pakietowej stopy błędów – PER (ang. Packet Error Rate) w funkcji odstępów sygnał szum – SNR (ang. Signal to Noise Ratio) lub FER (ang. Frame Error Rate) w funkcji SNR. Na rysunku 1 przedstawiono trzy charakterystyki $PER(SNR)$; są to charakterystyki uzyskane w tej samej sieci w tym samym, dwutygodniowym okresie obserwacji.



Rys. 1. Zależności pakietowych stóp błędów w funkcji wartości odstępów sygnału od szumu.

Jak wynika z wykresów zaprezentowanych na rys. 1 najbardziej odporną na błędy jest modulacja BPSK, a najmniej odporną jest modulacja 8PSK. Biorąc pod uwagę fakt, że typowa wartość SNR w sieciach nN zasilających lampy LED wynosi od 10 dB do 15 dB (przy mocy nadawczej 120 dB μ) to zastosowanie modulacji 8PSK jest niemożliwe. Możliwe za to jest zastosowanie modulacji QPSK, w przypadku której co dziesiąty (założono $SNR = 13$ dB) pakiet zostanie przekłamany. Stosując modulację BPSK można uznać, że transmisja jest praktycznie bezbłędna. Zakładając, że czas komunikacji z każdą lampą wynosi T_{BPSK} , gdy zastosowana jest modulacja BPSK to stosując modulację QPSK czas ten wynosi:

$$(1) \quad T_{QPSK} = T_{BPSK} \frac{O + 0,5B}{O + B},$$

gdzie: O to długość nagłówka ramki wyrażona w bajtach, a B to długość pakietu również wyrażona w bajtach.

Formuła (1) jest konsekwencją tego, że w wąskopasmowej transmisji PLC nagłówki ramki kodowane jest zawsze z zastosowaniem najbardziej niezawodnej modulacji (tu BPSK) oraz faktu, że modulacja QPSK jest dwa razy szybsza od modulacji BPSK. Dla czternastobajtowego nagłówka ramki [4] czas transmisji czterdziestobajtowego pakietu przy zastosowaniu modulacji BPSK będzie wynosił $432/p$, a modulacji QPSK czas ten, korzystając z (1) będzie wynosił $272/p$. Zakładając, że $p = 10$ kbit/s oraz że należy skomunikować się z pięćdziesięcioma lampami, które wysyłają dziesięciobajtowe potwierdzenie czas ten wyniesie 2,16 s dla modulacji BPSK, a modulacji QPSK 1,43 s. W porównaniu tym założono bezbłędną transmisję dla obydwóch typów modulacji. Uwzględniając dane prezentowane na rysunku 1 dla $SNR = 13$ dB, w przypadku modulacji QPSK oczekiwana liczba retransmisji na kierunku do lampy wyniesie co najmniej 5 razy, po upływie czasu co najmniej 150 ms, wartość ta wynika z szeregowej transmisji pomiędzy mikrokontrolerem a modem i pomiędzy komputerem a modemem. Zwiększając wartość 1,43 s o 5·150 ms otrzymano 2,18 ms, czyli praktycznie tyle samo co przy zastosowaniu niezawodnej chociaż "wolnej" transmisji BPSK.

Do tej pory, w niniejszym referacie rozpatrywano sytuację, w której wszystkie lampy były w bezpośrednim zasięgu koncentratora oraz jedynym źródłem zakłóceń były lampy i koncentrator. W przypadku braku bezpośredniego zasięgu, komunikacja z lampami odbywa się z zastosowaniem techniki multi-hop, w takim przypadku stopa błędów w całej ścieżce (PER_{path}) opisywana jest następującą zależnością:

$$(2) \quad PER_{path} = 1 - \prod_{h=1}^H (1 - PER_h),$$

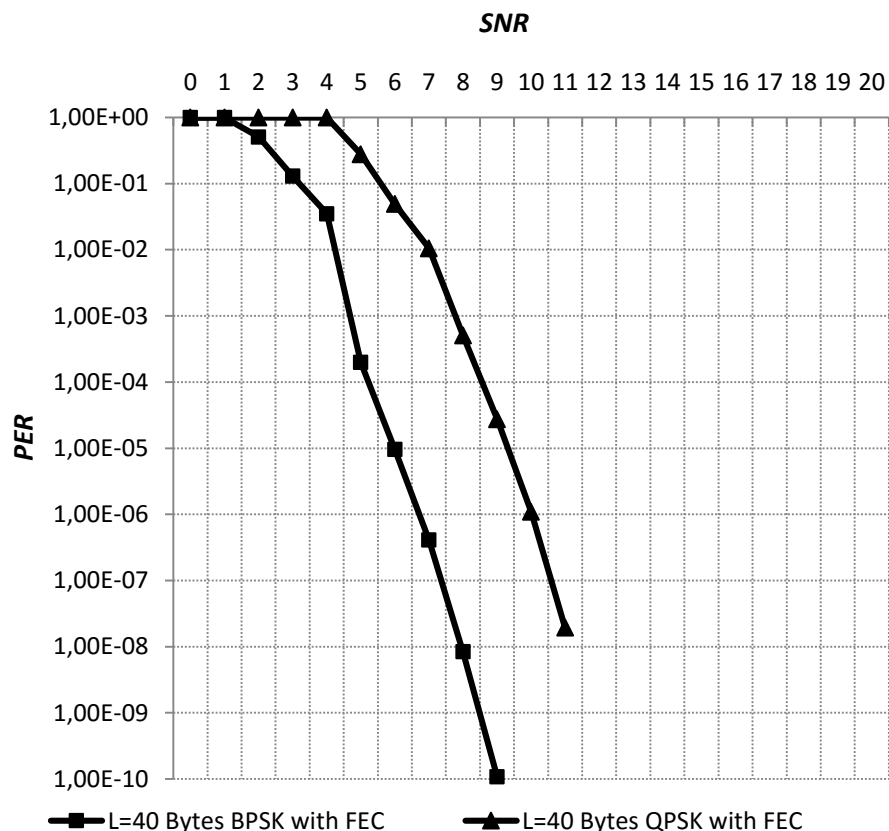
gdzie H to liczba skoków.

Zakładając, że maksymalna liczba skoków wynosi 8, a wartość SNR tak jak w poprzednim przykładzie 13 dB w każdym skoku, to korzystając z (2) i danych prezentowanych na rysunku 1: $PER_{path_BPSK} = 8 \cdot 10^{-5}$, a $PER_{path_QPSK} = 6 \cdot 10^{-1}$. Przykład ten opisuje sytuację, w której modulacja QPSK nie może znaleźć zastosowania podobnie jak 8PSK.

Z trzech stosowanych w wąskopasmowej transmisji PLC modulacji wyeliminowano dwie, pozostawiając BPSK. W przypadku zwiększenia poziomu szumów w sieci nN na przykład spowodowanego uszkodzeniem którejś z lamp lub dołączeniem do obwodu lamp, których konstrukcja nie uwzględnia transmisji PLC (jednocześnie spełniając [5]), wartość SNR spadnie do kilku dB, w takim przypadku nawet zastosowanie odpornej na błędy modulacji BPSK będzie niewystarczające, co wynika z danych zaprezentowanych na rysunku 1.

Zwiększenie skuteczności transmisji w warunkach małego SNR jest możliwe dzięki zastosowaniu korekty błędów w przód – FEC (ang. Forward Error Correction). Obecnie najczęstszą metodą realizacji FEC jest kodowanie splotowe [6]. Na rysunku 2 przedstawiono dwie charakterystyki $PER(SNR)$; są to charakterystyki dla modulacji BPSK i QPSK przy zastosowaniu FEC dla obydwóch typów PSK. Dane uzyskano w tej samej sieci w tym samym, półrocznym okresie obserwacji.

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016



Rys. 2. Zależności pakietowych stóp błędów w funkcji wartości odstępów sygnału od szumu, przy włączonej funkcji korekty błędów w przód.

Wadą zastosowania FEC jest zmniejszenie przepływności bitowej o połowę tzn. jak założono przepływność dla BPSK wynoszącą p po zastosowaniu FEC wyniesie $p/2$, a dla QPSK po zastosowaniu FEC wyniesie p – czyli tyle samo co dla BPSK bez FEC. Skuteczność FEC najlepiej wykazać porównując PER dla modulacji BPSK bez FEC (rys. 1) i PER dla modulacji QPSK z FEC. Te dwie metody transmisji charakteryzuje ta sama przepływność bitowa, jednak QPSK z FEC jest dużo bardziej niezawodna (np. dla $SNR = 7$ dB, 20000 razy).

Rozwiązania systemowe w zwiększeniu niezawodności transmisji

Stosując technikę multi-hop w warunkach wysokiego poziomu szumu w sieci nN, niezawodność modulacji QPSK w połączeniu z funkcją FEC może być niewystarczająca, a zastosowanie BPSK z FEC nie wydajne ze względu na zbyt małą szybkość transmisji. Z tego powodu proponuje się zastosowanie dwóch rozwiązań systemowych:

- 1) zastosowanie takiego schematu komunikacyjnego aby możliwe było tworzenie alternatywnych ścieżek w tym samym czasie, jest to technika multi-path,
- 2) zastosowanie modulacji BPSK z FEC gdy pakiet nadawany jest przez węzeł źródłowy albo docelowy, a w przypadku gdy pakiet nadawany jest przez węzeł pośredniczący modulacji QPSK z FEC.

Stosując technikę multi-path, stopa błędów (PER_{m-p}) opisywana jest następującą zależnością:

$$(3) \quad PER_{m-p} = \prod_{n=1}^N PER_n = \prod_{n=1}^N \left(1 - \prod_{h=1}^{H_n} (1 - per_h) \right),$$

gdzie N to liczba ścieżek.

Z analizy (3) wynika, że im większa jest liczba ścieżek alternatywnych tym niezawodność jest większa.

Propozycja drugiego rozwiązania systemowego podyktowana jest zwiększeniem niezawodności transmisji w pierwszym skoku, będącym częścią wspólną i jedynym łączy dla wszystkich ścieżek alternatywnych. Drugim powodem zastosowania modulacji BPSK z FEC w pierwszym skoku jest fakt, że koncentrator często znajduje się w większej odległości do pierwszej lampy niż odległość między lampami.

Zastosowanie wielokanałowego trybu transmisji

Wielokanałowy tryb transmisji jest powszechnie stosowany w systemach komunikacji bezprzewodowej krótkiego zasięgu. Polega on na jednoczesnym nasłuchiwanie kilku kanałów (najczęściej czterech) i przełączeniu się na odbiór ramki w kanale w którym najwcześniej wykryto jej preambułę. Obecnie w wąskopasmowej technice PLC z jedną nośną wielokanałowy tryb transmisji oparty jest na wykorzystaniu dwóch kanałów oddalonych od siebie o kilkanaście kHz, dlatego tryb ten w tematyce związanej z PLC nazywany jest z języka angielskiego dual-channel. Zastosowanie tego trybu transmisji w rozwiązaniach rozważanych w niniejszym referacie ma na celu zmniejszenie efektu "ukrytego węzła" podczas nadawania odpowiedzi przez węzeł docelowy w pierwszym skoku. Dla uproszczenia algorytmu protokołu opracowanego przez Autora dla potrzeb komunikacji PLC w systemach smart lighting przyjęto następującą zasadę: koncentrator i węzeł docelowy nadają w innym kanale niż węzły pośredniczące. Uwzględniając rozwiązania opisane w poprzednim rozdziale można sformułować prostą zasadę, przyjętą w zastosowanym schemacie komunikacyjnym [7], mianowicie: stosując modulację BPSK używa się innego kanału niż w przypadku użycia modulacji QPSK. Dodatkowo, ze względu na silniejsze tłumienie wysokich częstotliwości proponuje się aby przy zastosowaniu modulacji BPSK wykorzystywać kanał o mniejszej częstotliwości, w ten sposób uzyskuje się jeszcze większą niezawodność pomiędzy koncentratorom a pierwszą lampą.

Podsumowanie

W referacie nie opisano metody popularnego rozwiązania mającego zwiększyć niezawodność transmisji PLC jakim jest jednoczesne zastosowanie FEC i NPA (ang. Noise Peak Avoiding). Metoda NPA polega na transmisji sygnału tylko w połowie okresu przebiegu 230 V kiedy sinusoida przechodzi przez zero. Stosując to rozwiązanie przepływność transmisji zmniejsza się o połowę w stosunku do BPSK z FEC a skuteczność identyczna. Drugi powód to taki, że niemożliwym jest zastosowanie w koncentratorze jednego modemu do obsługi trzech faz, ponieważ przejście przez zero sygnału 230 V nie występuje co 10 ms lecz trzy razy częściej.

Proponowane rozwiązania systemowe, zastosowanie FEC i dwukanałowego trybu pracy oraz jednoczesne używanie dwóch rodzajów modulacji spowodowało około

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

dwukrotne zmniejszenie czasu komunikacji i zmniejszenie niezawodności komunikacji z 99,2% do 97,8%, czyli około 1,4% względem skuteczności początkowej. Wartość ta nie jest mała jednak nie ma znaczenia, uwzględniając fakt, że dysponuje się dodatkowym niezbędnym czasem wystarczającym na ponowną komunikację ze wszystkimi lampami, a nie tylko z tymi z którymi komunikacja się nie powiodła.

Literatura

1. Allalouf M., Gershinsky G., Lewin-Eytan L., Naor J. Smart Grid Network Optimization: Data-Quality-Aware Volume Reduction. IEEE Systems Journal, Vol. 8, No. 2, 2013, pp. 450 - 460.
2. 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.
3. 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.
4. Fiorelli R., Colombo M.: ST7580 Power Line Communication System-on-chip Design Guide, STMicroelectronics, 2012.
5. EN 61000-6-3: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 6-3: Generic standards - Emission standard for residential, commercial and light-industrial environments, 2007.
6. ITU-T Recommendation G.9904 (10/2012), Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers for PRIME networks, 2013.
7. Kiedrowski P., Dubalski B, Marciniak , Riaz T. , Gutierrez J., "Energy Greedy Protocol Suite for Smart Grid Communication Systems Based on Short Range Devices", Image Processing and Communications Challenges 3, Advances in Intelligent and Soft Computing Volume 102, pp. 493-502, 2011.

Autor: dr inż. Piotr Kiedrowski; Instytut Telekomunikacji i Informatyki, Wydział Telekomunikacji, Informatyki i Elektrotechniki, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, ul. Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, e-mail: piotr.kiedrowski@utp.edu.pl