

Łukasz ZBYDNIIEWSKI¹⁾, Tomasz ZIELIŃSKI¹⁾, Paweł TURCZA²⁾

¹⁾KATEDRA TELEKOMUNIKACJI (AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA)

²⁾KATEDRA METROLOGII (AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA)

Badania symulacyjne modelu transmisji szerokopasmowej PLC w domowych instalacjach elektrycznych 230/400 V

Mgr inż. Łukasz ZBYDNIIEWSKI

Ukończył Elektrotechnikę na Wydziale EAIiE, specjalności Automatyka i Metrologia, Akademii Górniczo-Hutniczej w 2006 roku. Obecnie jest studentem pierwszego roku studiów doktoranckich w Katedrze Telekomunikacji AGH. Jego obszar zainteresowań obejmuje Power Line Communication oraz cyfrowe przetwarzanie sygnałów.

e-mail: zbydniew@kt.agh.edu.pl



Prof. dr hab. inż. Tomasz ZIELIŃSKI

Absolwent kierunku Elektronika Wydziału EAIiE Akademii Górniczo-Hutniczej. Od 1982 do 2006 roku był zatrudniony w Katedrze Metrologii AGH, obecnie jest pracownikiem Katedry Telekomunikacji AGH. Zajmuje się algorytmami cyfrowego przetwarzania sygnałów w zastosowaniach pomiarowych w telekomunikacji i biomedycynie, w szczególności metodami analizy czasowo-częstotliwościowej sygnałów.

e-mail: tzielin@agh.edu.pl



Dr inż. Paweł TURCZA

Absolwent kierunków Informatyka i Elektronika Wydziału EAIiE Akademii Górniczo-Hutniczej. Związany zawodowo z AGH od 1993 roku, stopień doktora w dyscyplinie Elektronika uzyskał w roku 2001. Zajmuje się algorytmami przetwarzania sygnałów w zastosowaniach telekomunikacyjnych i pomiarowych oraz metodami ich efektywnej implementacji.

e-mail: turcza@agh.edu.pl



Streszczenie

W artykule zamieszczono wyniki badań symulacyjnych szerokopasmowej transmisji modemowej w środowisku sieci energetycznej. Przedstawiono charakterystykę kanału PLC i występujących w nim zakłóceń. Wykonano eksperymenty mające na celu sprawdzenie możliwości wykorzystania popularnej techniki OFDM do transmisji sygnałów w kanale PLC.

Słowa kluczowe: transmisja PLC, modem OFDM, kanał PLC

The simulation research of the model of broadband PLC transmission in home's electrical systems 230/400 V AC

Abstract

In this article simulation research of the model of broadband PLC broadband transmission in home's electrical systems were performed. A short characterization of PLC channel and its disturbances was presented. Simulation experiments, which purpose was to investigate the possibility using of OFDM technique for data transmission in PLC channel, were performed.

Keywords: PLC transmission, OFDM modem, PLC channel

1. Wprowadzenie

Technologia PLC (ang. Power Line Communication) umożliwia wykorzystanie infrastruktury sieci energetycznej w telekomunikacji [2]. Rozróżnia się dwa podziały transmisji PLC [1]. W pierwszym z nich bierze się pod uwagę przeznaczenia i uzyskiwane przepływności bitowe. W obrębie tego podziału wyróżniamy transmisję PLC typu wąskopasmowego (ang. narrowband) oraz szerokopasmowego (ang. broadband) [1].

Praca prowadzona w ramach projektu Network of Excellence Komisji Europejskiej, grant numer FP6-0384239 (CONTENT).

Wąskopasmowa transmisja PLC wykorzystuje pasmo częstotliwość określone przez normę PN-EN 50065 [9]. Definiuje ona częstotliwości od 9 do 148.5 kHz, które dzielone są na cztery podpasma. Pasmo A (9–95 kHz) przeznaczone jest dla urządzeń zasilających. Pasmo B (95–125 kHz), C (125–140 kHz) i D (140–148.5 kHz) przeznaczone są do wykorzystania przez odbiorców. Transmisja szerokopasmowa, ze względu na obowiązujące regulacje prawne, obejmuje zakres częstotliwości od 1 do 30 MHz [2]. Jej celem jest uzyskiwanie przepływności bitowych ponad 2 Mb/s, wymaganych przez nowoczesne aplikacje multimedialne.

Drugi podział bierze pod uwagę rodzaj infrastruktury sieci energetycznej. Wyróżnia się sieci PLC typu *dostępowego* (ang. access), które wykorzystują część sieci energetycznej dostarczającą energię do budynków, a więc znajdujące się zwykle na zewnątrz (ang. outdoor), oraz sieci PLC typu *wewnętrznego*, w obrębie jednego budynku (ang. indoor) [2].

Jedynie dla typu wąskopasmowego istnieją postanowienia regulacyjne w formie normy. Dla szerokopasmowych systemów PLC jak dotąd nie ma jednoznacznych określonych standardów. Ze względu na fakt, że jest to pasmo częstotliwości radiowych wykorzystywanych również przez nadajniki radiowe, bardzo istotny problem stanowi aspekt kompatybilności elektromagnetycznej EMC (ang. Electromagnetic Compatibility). W Europie, w tym zakresie, obowiązuje norma EN 55022 definiująca dopuszczalne poziomy z zaburzeń przewodowych i wspólnych generowanych przez urządzenia informatyczne [2].

W ostatnich latach trwają intensywne prace na standaryzacja technologii PLC [1]. Zaangażowane są w nie takie organizacje jak ETSI, IEEE oraz CENELEC. Oprócz nich sformowały się również organizacje przemysłowe skupiające wokół siebie kilkanaście firm z różnych branż. Jedną z nich jest HomePlug Powerline Alliance, której specyfikacja HomePlug 1.0 dostępna jest już od 2001 roku. Na rynku można znaleźć wiele urządzeń pracujących zgodnie z jej wytycznymi. Oferuje ona przepływności rzędu 14 Mb/s w warstwie fizycznej [2].

Kolejnym ciekawym projektem jest OPERA (ang. Open PLC European Research Alliance). Po wydanej w styczniu 2006 roku otwartej specyfikacji, odnośnie warstw fizycznej i warstwy MAC (specyfikacja ta przewiduje przepływności rzędu 200 Mb/s), projekt wszedł w drugą fazę zmierzając do tego, aby technologia PLC stała się prawdziwą alternatywą dla innych technologii [11].

Celem artykułu było zbudowanie i przetestowanie modelu symulacyjnego OFDM, szerokopasmowej transmisji danych w sieci energetycznej. Przedstawiono również metody modelowania kanału PLC typu wewnętrznego oraz zewnętrznego. Zaprezentowano charakterystykę występujących w nim szumu i specyficznych zakłóceń wąskopasmowych i impulsowych, a także metody ich generowania w celach symulacyjnych.

2. Modelowanie kanału PLC

Efektywna transmisja danych wymaga bardzo dobrej znajomości medium transmisyjnego [5], dlatego w tym punkcie przedstawiono opis i metody modelowania kanału PLC.

2.1. Kanał zewnętrzny – dostępowy

Jako zewnętrzny (dostępowy) (ang. outdoor) kanał PLC zaproponowano w pracach [8], [10] wielodrożny (ang. multipath) model w postaci równania:

$$\bar{H}(f) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot \underbrace{e^{-(a_0+a_1 f^k) d_i}}_{\text{tłumienie}} \cdot \underbrace{e^{-j2\pi f (d_i/v_p)}}_{\text{opóźnienie}} \quad (1)$$

Wartość N określa liczbę rozgałęzień w sieci energetycznej, g_i jest współczynnikiem wagowym i -tego odgałęzienia, d_i jego długością, k stanowi eksponent czynnika tłumiącego, a_0 , a_1 to parametry związane z tłumieniem oraz v_p – szybkość propagacji sygnału transmisyjnego w kablu.

Wartości powyższych parametrów wyznacza się dokonując pomiarów w sieci energetycznej. Odpowiedź impulsową i odpowiadającą jej odpowiedź częstotliwościową uzyskaną na podstawie powyższego wzoru i parametrów z pracy [10] przedstawiono na rysunku 1 (dolna para charakterystyk).

2.2. Kanał wewnętrzny – domowy

Nieco odmienna sytuacja występuje w przypadku kanału PLC w obrębie wewnętrznej sieci energetycznej budynku. Ze względu na mniejsze odległości, sygnały w poszczególnych odgałęzieniach są mniej tłumione [5]. Kolejną charakterystyczną cechą jest obecność wielu „mostkowych” połączeń, które są źródłem wcięć na charakterystyce częstotliwościowej [5] (rysunek 1).

Kanał wewnętrzny można modelować w postaci impulsów o malejącym wykładniczo module amplitudy, losowym znaku i przesunięciu między kolejnymi impulsami [10]. Przykładowy kanał tego typu, uzyskany jak poprzednio z pracy [10], przedstawiono w dziedzinie czasu i częstotliwości na rysunku 1 (górna para charakterystyk).

3. Modelowanie zakłóceń

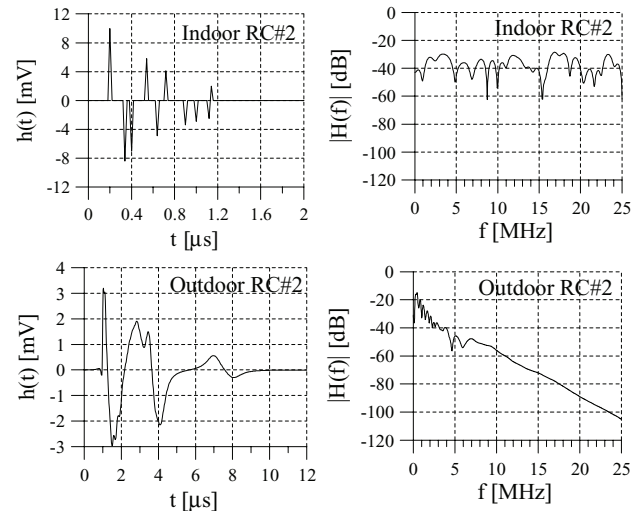
Przewody energetyczne nie zostały zaprojektowane dla celów komunikacyjnych zwłaszcza w zakresie wysokich częstotliwości. Dodatkowo duża liczba różnych urządzeń podłączonych do wielu punktów sieci powoduje, że w kanale PLC można spotkać wiele rodzajów zakłóceń. W literaturze [4], [6], [7] dotyczącej tego zagadnienia, jako główne rodzaje wymienia się: szum kolorowy tła, często występujący obok zakłóceń wąskopasmowych oraz okresowe i nieokresowe zakłócenia impulsowe.

W tym punkcie artykułu można znaleźć informacje na temat sposobu modelowania zakłóceń w kanale PLC, zastosowane również w niniejszych badaniach.

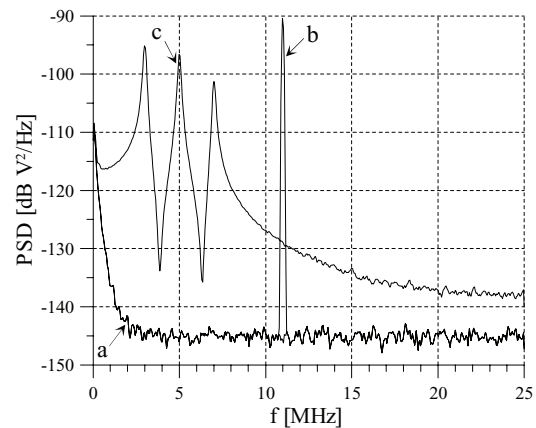
3.1. Szum kolorowy

Kanału PLC nie zawiera już jedynie szumu białego. Jego miejsce zajmuje szum kolorowy, którego gęstość widmowa mocy nie ma stałej wartości w dziedzinie częstotliwości. Dokument [10] proponuje modelowanie tego rodzaju szumu jako opisanego krzywą wyrażoną równaniem:

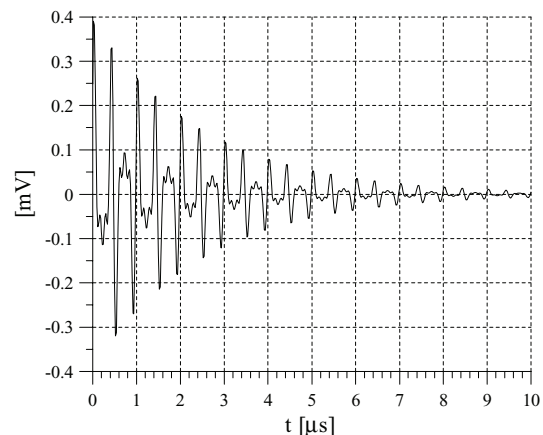
$$A(f) = A_\infty - A_0 \cdot e^{-f/f_0} \quad (2)$$



Rys. 1. Odpowiedzi impulsowe oraz odpowiadające im odpowiedzi częstotliwościowe symulowanego kanału PLC z [10]
Fig. 1. Impulse responses and corresponding frequency responses of simulated PLC reference channels from [10]



Rys. 2. Gęstość widmowa mocy zakłóceń: a – szum kolorowy tła, b – zakłócenia wąskopasmowe c – zakłócenia impulsowe
Fig. 2. Power spectral density of additive disturbances: a – colored wideband noise, b – narrowband interferences and c – impulsive disturbances



Rys. 3. Przebieg czasowy zakłóceń impulsowych
Fig. 3. Time waveform of impulsive disturbances

Parametr A_∞ określa gęstość widmową mocy dla dużych wartości częstotliwości. Parametr A_0 mówi o różnicy gęstości widmowej mocy między wartościami $A(\infty)$ oraz $A(0)$. Wartość f_0 umożliwia modelowanie szybkości opadania krzywej $A(f)$.

Widmo gęstości mocy dla parametrów: $A_0 = -38$ dB V²/Hz, $A_\infty = -145$ dB V²/Hz oraz $f_0 = 0.7$ MHz uzyskane metodą filtracji szumu równomiernego przez zaprojektowany na podstawie krzywej $A(f)$ filtr FIR, przedstawiono na rysunku 2 (krzywa „a”).

3.2. Zakłócenia wąskopasmowe

Kable energetyczne zwykle nie zawierają ochrony przed zakłóceniami wąskopasmowymi [2]. Ich źródłem w kanale PLC mogą być nadajniki radiowe lub niektóre urządzenia elektryczne. Tego typu zakłócenia można modelować w postaci wzoru:

$$n_{narr}(t) = A_c \sin\left(2\pi\left(f_c t + \frac{\Delta f}{2\pi f_m} \sin(2\pi f_m t)\right)\right) \quad (3)$$

gdzie A_c określa amplitudę fali nośnej o częstotliwość f_c , Δf jest dewiacją częstotliwości, a f_m – częstotliwością modulującą.

Widmo gęstości mocy zakłóceń dla parametrów: $A_c = 10$ mV, $f_c = 10.99$ MHz, $\Delta f = f_m = 24.4$ kHz, przedstawiono na rysunku 2 (krzywa „b”).

3.3. Zakłócenia impulsowe

Zakłócenia impulsowe powstają często w wyniku włączania lub wyłączania różnych urządzeń w sieci energetycznej [4]. Wyróżnia się trzy ich rodzaje: impulsowe zakłócenia okresowe synchroniczne lub asynchroniczne z częstotliwością sieci oraz zakłócenia nieokresowe [10]. Można je modelować w postaci sumy gasnących sinusoid wyrażonej równaniem:

$$n_{imp}(t) = \sum_{k=1}^3 A_k(t) \sin(2\pi f_k t + \phi) e^{-t/(T_k/4)} \quad (4)$$

gdzie A_k określa amplitudę składowej sinusoidy o częstotliwość f_k i fazie ϕ , a parametr T_k określa czas jej gaśnięcia.

Na rysunkach 2 (krzywa „c”) i 3 przedstawiono odpowiednio widmo gęstości mocy i przebieg czasowy zakłócenia impulsowego dla parametrów: $A_1 = 200$ mV, $A_2 = 170$ mV, $A_3 = 100$ mV, $f_1 = 3$ MHz, $f_2 = 5$ MHz, $f_3 = 7$ MHz oraz $T_k = 10$ μ s. Amplitudy impulsów zostały tutaj specjalnie wyolbrzymione, aby pokazać ich wpływ na średni SNR. Typowe, zmierzone w kanale PLC amplitudy, mieszczą się w zakresie od 8 do 17 mV [7].

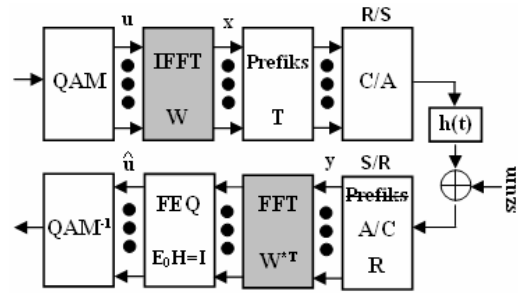
4. Modem PLC

Uproszczonego schematu blokowego standardowego modemu PLC opartego o technikę OFDM przedstawiony jest na rysunku 4 [3]. Dane przeznaczone do transmisji są najpierw kodowane z wykorzystaniem konstelacji QAM. Następnie, jako wektor \mathbf{u} , są: 1) modulowane przy użyciu N -punktowej, szybkiej odwrotnej transformaty Fouriera (IFFT), 2) uzupełniane o cykliczny prefiks długości M próbek ($M \geq L$) i w końcu 3) przetwarzane przez przetwornik C/A oraz transmitowane szeregowo przez kanał h o odpowiedzi impulsowej L . W odbiorniku, po procesie synchronizacji, cykliczny prefiks jest odrzucany. Następnie dokonuje się N -punktowej szybkiej transformacji Fouriera (FFT) oraz przeprowadza się korekcję w dziedzinie częstotliwości, aby skompensować amplitudowe i fazowe zniekształcenia. Cały system można opisać następującym równaniem macierzowym, wiążącym wejście \mathbf{u} z wyjściem $\hat{\mathbf{u}}$:

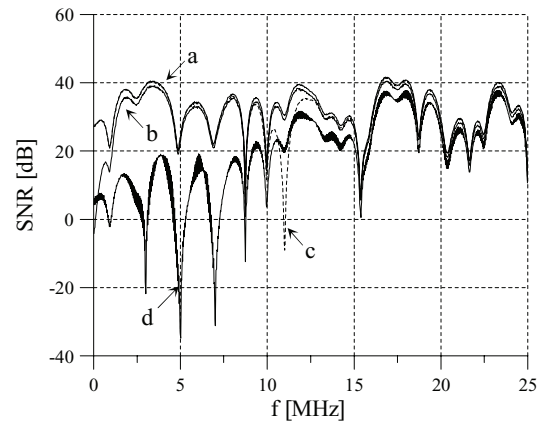
$$\hat{\mathbf{u}} = \mathbf{E}_0 \mathbf{W}^* \mathbf{T} \mathbf{R} \mathbf{H}_{lin} \mathbf{T} \mathbf{W} \mathbf{u} \quad (5)$$

gdzie \mathbf{W} oznacza N -punktową odwrotną macierz FFT, a macierze \mathbf{R} i \mathbf{T} odpowiadają odpowiednio dodaniu i odjęciu cyklicznego prefiksu:

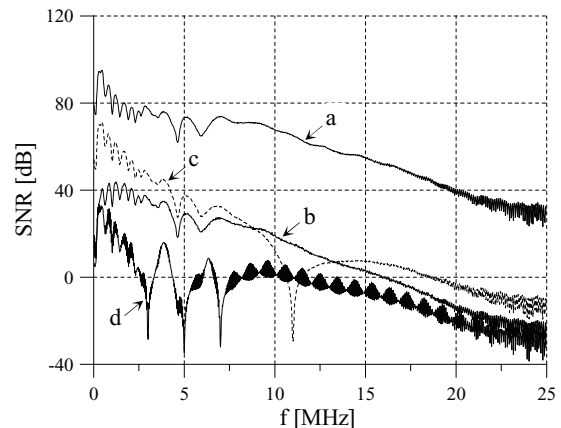
$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{M \times (N-M)} & \mathbf{I}_M \\ \mathbf{I}_N & \mathbf{0}_{N \times M} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{N \times M} & \mathbf{I}_M \\ \mathbf{I}_N & \mathbf{0}_{N \times M} \end{bmatrix}, \quad (6)$$



Rys. 4. Schemat blokowy modemu OFDM dla transmisji PLC
Fig. 4. Block diagram of OFDM modem for PLC transmission



Rys. 5. SNR w podpasmach dla kanału typu Indoor RC#2
Fig. 5. SNR in subbands for a reference channel Indoor RC#2



Rys. 6. SNR w podpasmach dla kanału typu Outdoor RC#2
Fig. 6. SNR in sub-bands for a reference channel Outdoor RC#2

\mathbf{H}_{lin} jest macierzą opisującą liniowy spłot z odpowiedzią impulsową kanału oraz \mathbf{E}_0 jest macierzą diagonalną częstotliwościowego korektora kanału:

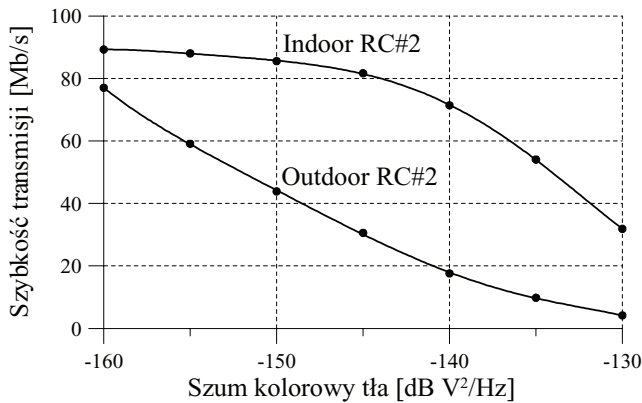
$$\mathbf{E}_0 = \text{diag}\left(1/(H(k) \exp(j2\pi k/N)), k = 0 \dots N-1\right) \quad (7)$$

z odpowiedzią częstotliwościową $H(k)$. Jeśli odpowiedź impulsowa kanału jest krótsza niż prefiks, wtedy:

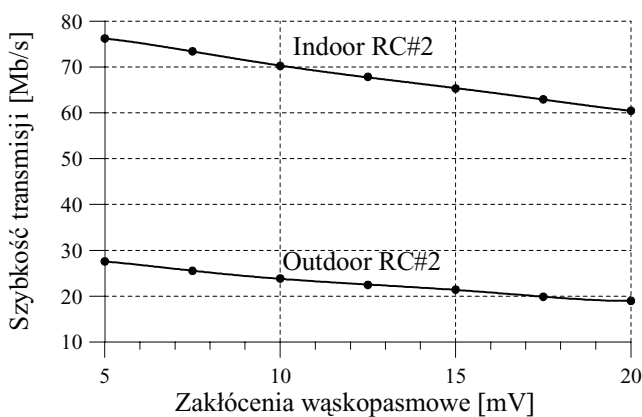
$$\mathbf{W}^* \mathbf{T} \mathbf{R} \mathbf{H}_{lin} \mathbf{T} \mathbf{W} = \text{diag}\left(H(0), H\left(\frac{2\pi}{N}\right), \dots, H\left(\frac{2\pi(N-1)}{N}\right)\right) \quad (8)$$

5. Wyniki symulacji

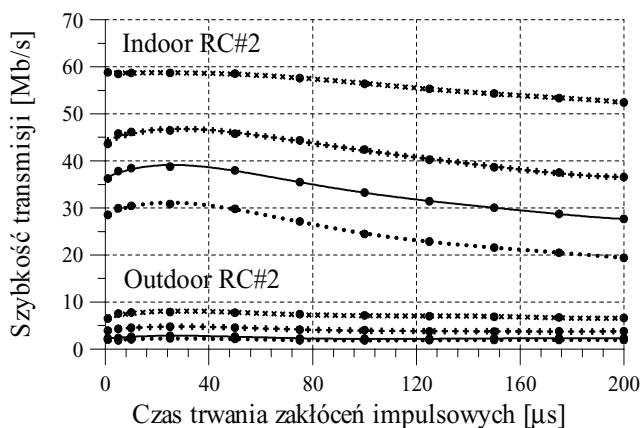
W badaniach wykorzystano odpowiedzi impulsowe kanału typu wewnętrznego (Indoor RC#2) oraz zewnętrznego (Outdoor RC#2) przedstawione na rysunku 1. Model transmisji OFDM stworzono w środowisku Matlab. Częstotliwość próbkowania dla wszystkich



Rys. 7. Porównanie średniej szybkości transmisji dla dwóch kanałów: Indoor RC#2 oraz Outdoor RC#2 w obecności kolorowego szumu tła [10]
Fig. 7. Comparison of mean bit rates for two reference channels: Indoor RC#2 and Outdoor RC#2 in presence of colored background noise [10]



Rys. 8. Porównanie średniej szybkości transmisji dla dwóch kanałów: Indoor RC#2 oraz Outdoor RC#2 w obecności zakłóceń wąskopasmowych [10]
Fig. 8. Comparison of mean bit rates for two reference channels: Indoor RC#2 and Outdoor RC#2 in presence of narrowband interferences [10]



Rys. 9. Porównanie średniej szybkości transmisji dla dwóch kanałów: Indoor RC#2 oraz Outdoor RC#2 w obecności zakłóceń impulsowych
Fig. 9. Comparison of mean bit rates for two reference channels: Indoor RC#2 and Outdoor RC#2 in presence of impulsive interferences

symulacji przyjęto 50 MHz.

Długość ramki FFT wynosiła 2048 próbek, a cykliczny prefiks przyjęto o długości 512 próbek dla obu kanałów. Wartość mocy sygnału transmitowanego założono -70 dB V^2/Hz .

Podczas symulacji użyto opisanych w punkcie 3 modeli zakłóceń. Ich parametry również pozostały takie same. Jedyne w przypadku badań wpływu zakłóceń impulsowych na przepływność (rysunek 9), oprócz amplitud impulsów: $A_1 = 200$ mV, $A_2 = 170$ mV, $A_3 = 100$ mV (linia ciągła), wykonano dodatkowe symulacje dla każdego kanału i amplitud $A_1=A_2=A_3$ równych

kolejno: 50 mV (linia x), 100 (linia +) i 200 mV (linia kropkowana). We wszystkich przypadkach były one powtarzane okresowo co piątą ramkę.

Dokonano symulacji wartości parametru SNR (ang. Signal to Noise Ratio) w podpasmach, których wyniki przedstawiono na rysunkach 5 i 6. Literami **a** – **d** oznaczono kolejno symulacje: **a** – bez zakłóceń, **b** – z szumem kolorowym, **c** – z zakłóceniami wąskopasmowymi oraz **d** – z zakłóceniami impulsowymi.

Szybkość transmisji b_m przeliczono z symulowanej wartości średniego SNR_m według zależności:

$$\gamma = 10^{((9.8+mar-cg)/10)} \quad (9)$$

$$b_m = \left\lfloor \log_2 \left(1 + \frac{SNR_m}{\gamma} \right) \right\rfloor \quad (10)$$

Parametry *mar* (ang. margin) i *cg* (ang. coding gain) przyjęto odpowiednio 6 dB i 0 dB (brak kodowania spłotowego). Założono, że stosowana jest modulacja QAM.

Rysunki 7 i 8 przedstawiają wyniki symulacji wpływu odpowiednio poziomu szumu kolorowego i amplitudy zakłóceń wąskopasmowych na przepływności bitowe. Do zakłóceń impulsowych i wąskopasmowych dodawano szum kolorowy tła na poziomie $A_\infty = -145$ dB V^2/Hz .

6. Wnioski końcowe

W artykule tym przedstawiono wyniki badań symulacyjnych modemu OFDM wykorzystanego do komunikacji w środowisku sieci elektroenergetycznej. Pokazano również, w jaki sposób można modelować kanał PLC oraz typowe zakłócenia w nim występujące. Większe szybkości transmisji uzyskano w kanale typu wewnętrznego. Dla obu kanałów równie groźne okazały się zakłócenia impulsowe, których redukcja będzie przedmiotem dalszych badań.

7. Literatura

- [1] E. Biglieri, S. Galli, Y-H Lee, H.V. Poor and A. J. H. Vinck: Guest editorial power line communications. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 24, no. 7, July 2006, pp. 1261- 1266 (special issue on PLC).
- [2] H. Hrasnica, A. Haidine, R. Lehnert: Broadband powerline communications networks – network design. John Wiley & Sons, Ltd, New York 2004.
- [3] T.P. Zieliński: Cyfrowe przetwarzanie sygnałów – Od teorii do zastosowań. WKiŁ Warszawa 2005.
- [4] M. Zimmermann and K. Dostert: An analysis of the broadband noise scenario in powerline networks, in Proc 4th International Symposium Powerline Communications, April 2000, pp. 131-138.
- [5] E. Biglieri: Coding and modulation for a horrible channel. IEEE Communications Magazine, vol. 41, no. 5, May 2003, pp. 92-98.
- [6] M. Gotz, M. Rapp, K. Dostert: Power line channel characteristics and their effect on communication system design. IEEE Communications Magazine, vol. 42, no. 4, Apr 2004, pp. 78- 86.
- [7] T. Esmailian, F.R. Kschischang, P.G. Gulak: In-building power lines as high-speed communication channels: channel characterization and a test channel ensemble. International Journal of Communication Systems, 2003:16:381-400.
- [8] M. Zimmermann, K. Dostert: A multipath model for the Powerline channel, IEEE Transactions on communications, vol. 50, no. 4, April 2002, pp. 553-559.
- [9] PN-EN 50065-7:2002: Transmisja sygnałów w sieciach elektrycznych niskiego napięcia w zakresie częstotliwości od 3 kHz do 148,5 kHz.
- [10] OPERA Open PLC European Research Alliance: Theoretical postulation of PLC channel model.
- [11] www.ist-opera.org