

Skuteczność transmisji BPL-PLC w górniczych sieciach kablowych średniego napięcia

Streszczenie. W artykule omówiono podstawowe zasady transmisji BPL-PLC zwracając uwagę na ograniczenia jej efektywności w praktyce. Przedstawiono jeden z praktycznych sposobów modelowania kanału komunikacyjnego z wykorzystaniem linii elektroenergetycznej. Opisano sposób wykonania odpowiednich badań rozpoznawczych dotyczących możliwości wykorzystania transmisji BPL w górniczych sieciach kablowych średniego napięcia. Na podstawie uzyskanych wyników badań sformułowano odpowiednie wnioski praktyczne.

Abstract. Paper discusses basic principles of BPL-PLC transmission paying attention to the limits of its effectiveness in practice. The one of the practical ways of modeling of the transmission channel using an electric power line is presented. The implementation of the relevant exploratory study on the use of the BPL transmission in the existing mining cable networks of MV has been described. Based on the research results the appropriate practical conclusions have been formulated. **Efficiency of BPL-PLC transmission in the middle voltage cable network.**

Słowa kluczowe: transmisja PLC, technologia BPL, skuteczność, średnie napięcie.

Keywords: PLC transmission, BPL technology, efficiency, middle voltage.

Wstęp

W technologii PLC (ang. Power Line Communications) sieci elektroenergetyczne są równocześnie wykorzystane, oprócz przesyłu energii elektrycznej, jako medium transmisyjne do celów komunikacyjnych. Powszechnie, stosowana transmisja PLC jest głównie transmisją wąskopasmową (ang. Narrow Band PLC), umożliwiającą przesyłanie sygnałów z maksymalną prędkością 100-200 kb/s (kilobitów na sekundę). W tej transmisji częstotliwość sygnału nośnego (w linii energetycznej) zamyka się w paśmie od kilku do kilkuset kHz (2 kHz – 150 kHz). Transmisja BPL natomiast (ang. Broadband PLC) jest transmisją szerokopasmową PLC, pozwalającą na przesył sygnałów ze znacznie większą prędkością, dochodzącą do 200 Mb/s (megabitów na sekundę), czyli 1000 razy szybciej niż w komunikacji wąskopasmowej. Sygnał nośny transmisji BPL zawiera się w paśmie od 2 do 30 MHz. Należy w tym miejscu zaznaczyć, że praktyczne wykorzystanie technologii BPL napotkało na pewne ograniczenia wynikające z potencjalnych tendencji do zakłócania pracy systemów wojskowych czy cywilnych wykorzystujących niektóre pasma z zakresu częstotliwości BPL. Aktualnie jednak oferowane na rynku (przez renomowane niektóre firmy zagraniczne), rozwiązania transmisji BPL posiadają możliwość blokowania tej transmisji w wybranych pasmach częstotliwości uniemożliwiając tym samym wprowadzanie w tych pasmach zakłóceń. Należy też nadmienić, że rozszerzaniu zastosowania technologii BPL nie sprzyja silna konkurencja ze strony operatorów technologii bezprzewodowych. Podstawowym zadaniem sieci elektroenergetycznych jest przesył i dystrybucja energii elektrycznej od wytwórcy do użytkownika. Wszyscy więc inni użytkownicy tych sieci, w tym między innymi z zakresu komunikacji PLC, powinni się dostosować do istniejących technicznych warunków i ograniczeń występujących w sieciach elektroenergetycznych. Struktura i cechy fizyczne tych sieci różnią się bowiem dość znacznie od tych występujących w tradycyjnych kanałach komunikacyjnych (skrętka, Ethernet, kabel koncentryczny czy światłowód). Istotnym zagrożeniem są tutaj wszelkiego rodzaju zakłócenia występujące podczas eksploatacji sieci elektroenergetycznej (zwarcia, przerwy w pracy, zmiana topologii itp.). Jednym z obszarów efektywnego wykorzystania technologii BPL wydają się być sieci górnicze z uwagi na możliwość, przede wszystkim, podniesienia bezpieczeństwa pracy kopalni. Prawdopodobieństwo uszkodzenia bowiem górniczych linii

kablowych podczas awarii w kopalni jest stosunkowo najmniejsze.

W artykule przedstawiono wyniki badań skuteczności transmisji BPL dla wybranej górniczej linii kablowej średniego napięcia, zasilającej transformatory przekształtnikowe, a więc linii o największym poziomie zakłóceń powodowanych wyższymi harmonicznymi prądu. Sformułowano odpowiednie wnioski praktyczne.

Zakłócenia w sieci elektrycznej wpływające na jakość i skuteczność transmisji PLC

W przypadku wykorzystania linii elektroenergetycznej w innym celu niż do przesyłu i rozdziału energii elektrycznej należy poznać i wyjaśnić również zakłócający wpływ różnego rodzaju odbiorników energii elektrycznej (zwłaszcza półprzewodnikowych) – z niej zasilanych. Należy zaznaczyć, że źródłem zakłóceń tak przenoszonych jak i indukowanych, są wszelkiego rodzaju stany przejściowe związane z czynnościami łączeniowymi. Głównym źródłem zakłóceń pola elektromagnetycznego są jednak powszechnie obecnie stosowane nowoczesne źródła oświetlenia, urządzenia gospodarstwa domowego, elektryczne piece akumulacyjne, zasilacze impulsowe czy kasy fiskalne [2, 3, 4]. Przykładem zagrożenia zakłóceniami dla transmisji BPL mogą być wszelkie usługi radiowe (np. radio amatorskie) pracujące w paśmie 2 MHz – 30 MHz (fale średnie i długie) [5]. Powszechnie przyjęto, że do podstawowych zakłóceń w liniach elektroenergetycznych należą [5, 6]:

- szum kolorowy,
- zakłócenia wąskopasmowe,
- zakłócenia impulsowe: okresowe, synchroniczne w stosunku do częstotliwości sieci, okresowe, asynchroniczne w stosunku do częstotliwości sieci, losowe, asynchroniczne.

Tzw. szum biały stanowi efekt nakładania się różnych źródeł tzw. szumu kolorowego o różnych amplitudach i różnych częstotliwościach. Jego wartość jest największa w pobliżu częstotliwości technicznej (50 Hz), może jednak być istotna dla nielicznych częstotliwości dochodzących do 20 kHz [6].

Zakłócenie wąskopasmowe występuje w wąskich pasmach częstotliwości charakteryzując się wysoką wartością współczynnika PSD (Power Spectral Density) i przyjmuje postać tzw. „ostrych szpilek”. Są one wynikiem głównie aktywności nadawczych stacji radiowych pracujących w zakresie od 1 MHz do 22 MHz. Te zaś o

niższych częstotliwościach generowane są podczas czynności łączeniowych niektórych odbiorników elektrycznych takich jak np. telewizorów, zasilaczy, świetlówek, komputerów czy monitorów [6].

Impulsowe, okresowe, zakłócenie synchroniczne powstaje podczas czynności łączeniowych dokonywanych np. w prostownikowych zasilaczach prądu stałego czy podczas pracy tzw. ściemniaczy oświetlenia (regulacja współczynnika impulsów). Charakteryzuje się ono krótkim czasem trwania [6]. Asynchroniczne zaś okresowe zakłócenie impulsowe (występujące w zakresie częstotliwości od 50 kHz do 200 kHz) powodowane są głównie pracą zasilaczy impulsowych [4]. Należy podkreślić, że asynchroniczne zakłócenia impulsowe (o czasie trwania impulsu od kilku mikrosekund do kilku milisekund) mogą pojawiać się w różnych fragmentach sieci elektroenergetycznych [5]. Wszelkie zakłócenia pojawiające się cyklicznie w określonych przedziałach czasu traktowane są jako zakłócenia główne – tzw. „szum tła”. Pozostałe zaś rodzaje zakłóceń mają charakter losowy i generalnie są traktowane jako losowe zakłócenia impulsowe.

Modelowanie kanału komunikacyjnego w linii energetycznej

Wybór technologii transmisji i jej parametrów użytkowych opiera się w praktyce na wynikach uzyskanych podczas badań modelu komunikacyjnego [7]. Badania skuteczności transmisji w liniach energetycznych, przy wykorzystaniu kanału komunikacyjnego dużych prędkości, stanowi główne zadanie implementacyjne systemu BPL-PLC. W modelu kanału komunikacyjnego, oprócz uwzględnienia synchronicznych i asynchronicznych zakłóceń impulsowych, istnieje również możliwość odwzorowania rozgałęzień linii energetycznych, których występowanie wpływa na pogorszenie się parametrów transmisji [1]. Liczne bowiem rozgałęzienia w sieci elektrycznej czy też występowanie niedopasowania impedancji, mogą powodować odbicia sygnału prowadzące do transmisji wielościeżkowej. W efekcie, uwzględniając tłumienność linii elektroenergetycznej (zależnej od częstotliwości), funkcja transferu kanału komunikacyjnego jest zmienna w czasie. Modele funkcji transferu $H(f)$ dla kanału komunikacyjnego, transmisji wielościeżkowej, zostały opisane w [8], w postaci:

$$(1) \quad H(f) = \sum_{i=1}^{NP} g_i \cdot e^{-(a_0+a_1 f^k) d_i} \cdot e^{-j2\pi f \tau_i}$$

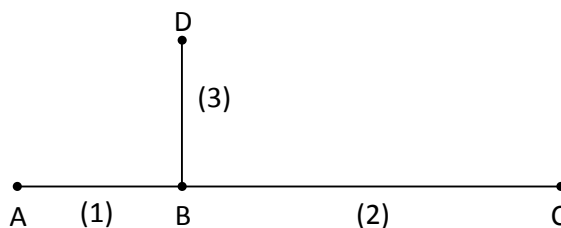
gdzie: $H(f)$ - propagacja sygnału linii energetycznej w zakresie częstotliwości 500 kHz – 20 MHz, NP - liczba odpowiednich ścieżek propagacji, g_i - współczynnik wagowy, d_i - długość i-tej ścieżki.

W powyższym modelu odbicia sygnału wynikają z superpozycji sygnałów przychodzących z NP – różnych ścieżek. Zależne zaś od częstotliwości wartości tłumienności są określane przez parametry: a_0 , a_1 oraz wykładnik potęgi k . W modelu tym pierwszy człon wyraża tłumienność linii zaś drugi uwzględnia efekt opóźnienia sygnału, określony wykładnikiem potęgi τ_i :

$$(2) \quad \tau_i = \frac{d_i \sqrt{\epsilon_r}}{c_0} = \frac{d_i}{v_p}$$

gdzie: ϵ_r – stała dielektryczna materiału, c_0 – prędkość światła w próżni, v_p - prędkość propagacji.

Na rysunku 1 przykładowo przedstawiono sieć elektroenergetyczną, składającą się z trzech odcinków linii o różnej długości i różnej wartości impedancji zgodnie z [7].

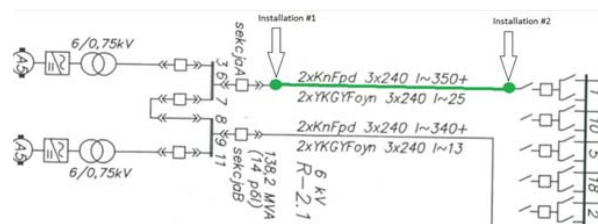


Rys.1. Przykład linii energetycznej z jednym odgaśleniem powodującym wielościeżkową propagację

Jeśli w punktach A i C są spełnione warunki dotyczące dopasowania impedancyjnego, to wówczas odgaślenie linii B, D może generować odbicia w sieci. Powyższe odbicia skutkują występowaniem wielokrotnej liczby ścieżek propagacji między węzłami A i C, np. ABC, ABDB, ... C itd. Wówczas współczynnik odbicia, w każdym odgaśleniu, wpływa na efektywność propagacji, poprzez zmianę jego współczynnika wagowego c_i . Na podstawie odpowiedzi częstotliwościowej, można określić parametry tłumienności: a_0 , a_1 i k . Wartości zaś parametru dotyczącego odpowiedzi: c_i , d_i , τ_i , mogą być określone poprzez analizę odpowiedzi impulsowej kanału. Liczba ścieżek w kanale transmisyjnym może zmieniać się w granicach od 5 do 50 [9]. Mając zatem określone ww. parametry dla wybranej długości i konfiguracji sieci elektroenergetycznej, można ocenić przydatność proponowanej do zastosowania technologii PLC, zwłaszcza BPL.

Badanie efektywności transmisji BPL-PLC w sieciach górniczych średniego napięcia

W celu określenia przydatności transmisji BPL-PLC w praktyce przeprowadzono odpowiednie badania jej efektywności w wybranej górniczej sieci średniego napięcia. Do prób wybrano istniejący fragment sieci kablowej 6 kV zasilającej transformatory przekształtnikowe z uwagi na znaczny poziom zawartości wyższych harmonicznych prądu, a więc na potencjalne duże zagrożenie zakłóceniami [10,11]. Mając na uwadze różne doświadczenia autorów dotyczące efektywności transmisji PLC w sieciach elektrycznych niskiego napięcia do prób wybrano alternatywne rozwiązania BPL dwóch renomowanych firm światowych [12]. Wybrany fragment linii kablowej 6 kV wraz z zaznaczeniem miejsc lokalizacji urządzeń BPL pokazano na rys. 2.



Rys.2. Testowana linia 6 kV z zaznaczeniem miejsc zainstalowania urządzeń BPL

Urządzenia nadawczo-odbiorcze BPL zainstalowano na jednej, losowo wybranej, fazie pracującego kabla (40 letniego) w izolacji papierowo-olejowej o długości około 350m., korzystając ze sprzęgaczy pojemnościowych przyłączonych do szyn zbiorczych jak na rys. 3.

Sprawdzono również efektywność transmisji dwufazowej tzw. metodą różnicową. Sposób wykonania instalacji sprzęgaczy pojemnościowych w tym drugim przypadku pokazano na rys. 4, zaś schemat realizacji

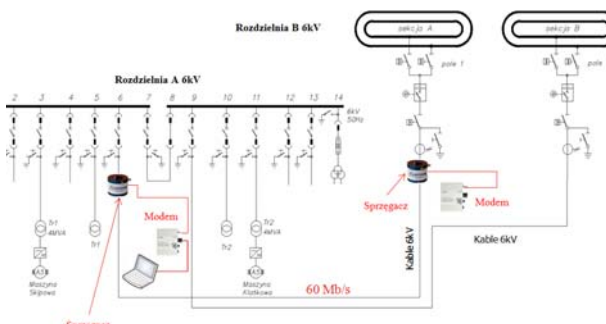
transmisji BPL w dwóch rozdzielniach A i B (6 kV) oraz schemat blokowy podłączenia układów pomiarowo-rejestrujących z zastosowaniem szerokopasmowych modemów HDC Gateway, w dwóch różnych podstacjach, na rys. 5 i 6 odpowiednio.



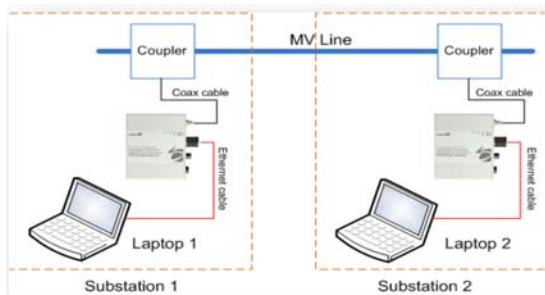
Rys.3. Instalacja sprzęgaczy pojemnościowych do transmisji w jednej fazie



Rys.4. Instalacja sprzęgaczy pojemnościowych do transmisji metodą różnicową



Rys.5. Miejsce zabudowy sprzęgaczy indukcyjnych lub pojemnościowych na wybranym kablu SN



Rys.6. Przykład schematu połączeń układu BPL przy wykorzystaniu sprzęgaczy pojemnościowych lub indukcyjnych

Testy przepustowości i opóźnienia transmisji wykonano dla następujących warunków pracy kablowej linii elektroenergetycznej:

- kabel 6 kV bez napięcia, pomiar parametrów transmisją 1-fazą,
- kabel 6 kV pod napięciem bez obciążenia, pomiar parametrów transmisją 1-fazą,
- kabel 6 kV pod napięciem bez obciążenia, pomiar metodą różnicową,
- kabel 6 kV pod napięciem z obciążeniem prądowym około 400A, pomiar metodą różnicową.

Celem przeprowadzonych badań było sprawdzenie przydatności transmisji BPL w kopalni dla potrzeb, między innymi, sterowania i nadzoru pracujących tam urządzeń elektrycznych. Wymagało to sprawdzenia niezbędnych warunków transmisji takich jak:

- opóźnienia w przesyłaniu danych na poziomie <20 ms,
- prędkość transferu danych na poziomie przynajmniej 1Mb/s.

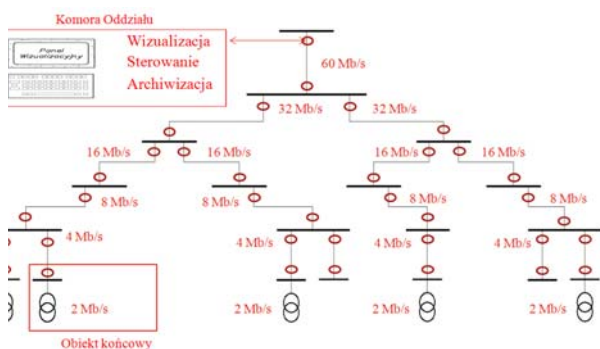
Z uzyskanych wyników, dla przeprowadzonych prób, można stwierdzić, że efektywność transmisji BPL może być różna dla różnych rozwiązań oferowanych przez producentów. Pomierzona prędkość transmisji zmieniała się bowiem w granicach od (5-6) Mb/s (rozwiązanie jednego producenta) do około (50-60) Mb/s (rozwiązanie drugiego producenta) zaś czas opóźnienia przesyłu danych od (3-4) ms do (6-8) ms odpowiednio. Badanie efektywności ciągłości przesyłania pakietów wysyłanych co 1 sek, w okresie czasu jednego tygodnia, wykazały, że na ogólną liczbę wysłanych 600 000 pakietów ich straty w najlepszym przypadku wynosiły około 0,007% (42 pakiety stracone) zaś w najgorszym dochodziły do około 0,06% (350 pakietów straconych) w zależności od rozwiązania oferowanego przez producenta. Reasumując można stwierdzić, że przeprowadzone próby wykazały praktyczną przydatność technologii BPL do transmisji sygnałów w istniejącej infrastrukturze kopalnianych sieci kablowych średniego napięcia. Najlepsze bowiem rozwiązanie charakteryzuje się zadawalającą prędkością transmisji na poziomie około 60 Mb/s przy opóźnieniu przesyłu nie przekraczającym (3-4) ms i stracie pakietów danych na niskim poziomie równym około 0,007%. Stwierdzono jednak, że w pewnych przypadkach może występować pogorszenie się efektywności transmisji powodowane tłumieniem oddziaływaniem szyn zbiorczych. Zastosowanie zatem określonego rozwiązania BPL oraz sposobu jego implementacji wymaga każdorazowo poprzedzenia tego kroku odpowiednim badaniem efektywności transmisji na danym obiekcie rzeczywistym.

Praktyczne możliwości wykorzystania transmisji BPL-PLC w warunkach kopalnianych

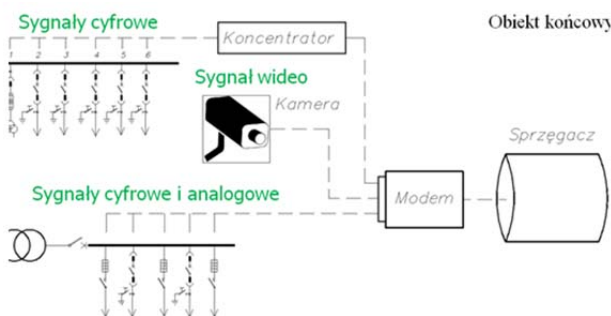
Uzyskane wyniki pomiarów potwierdzają, iż transmisja danych technologią BPL przy wykorzystaniu istniejącej infrastruktury kopalnianych kabli średniego napięcia jest skuteczna i może znaleźć praktyczne zastosowanie nie tylko w warunkach kopalnianych. Testowane rozwiązania w zasadzie funkcjonowały poprawnie, wykazując jednak różną efektywność transmisji. Można więc stwierdzić, że dzięki wykorzystaniu transmisji w technologii BPL, możliwym jest między innymi, stworzenie systemu zdalnego nadzoru pozwalającego kontrolować obszar na przykład wybranego oddziału elektrycznego (minimum 5 poziomów rozdzielni w układzie promieniowym), tak jak pokazano to dla przykładu na rys. 7.

Pozwala to zapewnić komunikację z obiektem końcowym na poziomie szybkości nie mniejszym niż 2 Mb/s, co umożliwia na przykład bezproblemową transmisję

obrazów oraz przesył sygnałów tak analogowych jak i cyfrowych, jak przedstawiono to na rys. 8.



Rys.7. Przykład możliwej struktury transmisji BPL (z szybkością min. 2 Mb/s) dla obiektu końcowego



Rys.8. Przykładowy schemat akwizycji danych dla rozdzielni 6 kV i podstacji 6/0.5 kV

Dzięki więc wykorzystaniu technologii BPL autorzy widzą możliwość realizacji systemu nadzoru umożliwiającego na przykład:

- stały nadzór nad stanem pól rozdzielni 6kV oraz stacji pojazdowych,
- zdalne sterowanie stacjami transformatorowymi, wraz z ich poszczególnymi podzespołami,
- zdalną kontrolę centralnych zabezpieczeń upływnościowych zabudowanych w stacjach transformatorowych,
- nadzór nad pracą pomp w pompowniach rejonowych,
- obserwację rozdzielni i podstacji za pomocą kamer telewizyj przemysłowej,
- zdalne wykonywanie oględzin codziennych obiektów,
- otrzymywanie natychmiastowych informacji np. o braku zasilania obiektu,
- archiwizację i cyfrowe potwierdzenie wykonanych przełączeń oraz oględzin,
- szybszą reakcję elektromontera na wszelkie zakłócenia i nieprawidłowości w pracy kontrolowanych urządzeń.

Wnioski

Przeprowadzone w warunkach kopalnianych, badania efektywności transmisji BPL przy wykorzystaniu istniejącej struktury kabli średniego napięcia, wykazały, że istnieją realne szanse na wykorzystanie tego typu technologii dla potrzeb kopalni. Możliwość ta występuje w szeroko pojętych systemach kontroli, nadzoru i sterowania. Wykorzystanie jednak danego rozwiązania BPL dostępnego na rynku wymaga, w każdym przypadku, wcześniejszego zbadania jego efektywności pracy w rzeczywistych warunkach kopalnianych. W tym miejscu należy podkreślić, że są one więc jak najbardziej przydatne dla zastosowań w praktyce.

LITERATURA

- [1] Khalifa S. Al Mawali, Techniques for Broadband Power Line Communications: Impulsive Noise Mitigation and Adaptive Modulation, *Rozprawa doktorska, RMIT University*, July (2011)
- [2] Yousuf M. S., El-Shafei M., Power line communications: an overview - part1, *Proc. of Innovations '07*, (2007), 218-222
- [3] Yousuf M. S., Rizvi S. Z., El-Shafei M., Power line communications: an overview – part2, *Proc. 3rd Int'l Conf. Info. and Communication Technologies: From Theory to Applications*, (2008), 1-6
- [4] Meng H., Guan Y.L., Chen S., Modeling and analysis of noise effects on broadband power-line communications, *IEEE Trans. Power Delivery*, 20 (2005), n.2, 630-637
- [5] Zimmermann M., Dostert K., Analysis and modeling of impulsive noise in broad-band powerline communications, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 44 (2002), n.1, 249-258
- [6] Meng H., Guan Y. L., Chen S., Modeling and analysis of noise effects on broadband power-line communications, *IEEE Trans. Power Delivery*, 20 (2005), n.2, 630-637
- [7] Biglieri E., Torino P., Coding and modulation for a horrible channel, *IEEE Communications Magazine*, 41 (2003), n.5, 92-98
- [8] Zimmermann M., Dostert K., A multipath model for the powerline channel, *IEEE Trans. on Communications*, 50 (2002), n.4, 553-559
- [9] Götz M., Rapp M., Dostert K., Power line channel characteristics and their effect on communication systems design, *IEEE Communications Magazine*, 42 (2004), n.4, 78-86
- [10] Tomczyk A., Bęben B., Wańdzio J., Wosik J., Kozłowski A., Możliwość wykorzystania technologii BPL-PLC w kablowych sieciach górniczych średniego napięcia, *Symposium Naukowo-Techniczne SEMAG-2014 nt. Aktualne Problemy Automatyki i Elektroenergetyki w Przemśle Wzrostowym, Złotniki Lubańskie 26 – 28 maja*, (2014), 84-95
- [11] Pyda D., Habrych M., Rutecki K., Miedzinski B., Analysis of narrow band PLC technology performance in low-voltage network, *Elektronika ir Elektrotechnika*, 20 (2014), n.5, 61-64
- [12] Miedzinski B., Habrych M., Rutecki K., Pyda D., Tomczyk A., Bęben B., Dzierżanowski W., Wąsowski M., Badania laboratoryjne oceny przydatności technologii wąsko i szerokopasmowych PLC z punktu widzenia komercyjnego, *Raport Instytutu Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej serii SPRAWOZDANIA NR SPR I-8/S-19/2013*,

Autorzy: dr inż. Marcin Habrych, dr inż. Andrzej Tomczyk, mgr inż. Bartosz Bęben, Politechnika Wroclawska, Katedra Energoelektryki, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: marcin.habrych@pwr.edu.pl; prof. dr hab. inż. Bogdan Miedziński, Instytut Technik Innowacyjnych EMAG, ul. Leopolda 31, 40-189 Katowice, E-mail: b.miedzinski@emag.pl