

**Zdzisław PAPIR¹, Jacek DAŃDA¹, Krzysztof ŁOZIAK¹,
Jacek WSZOŁEK¹, Marek NATKANIEC¹, Władysław ŁOZIAK²**

¹AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, KATEDRA TELEKOMUNIKACJI

²AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, KATEDRA AUTOMATYKI NAPIĘDU I URZĄDZEŃ PRZEMYSŁOWYCH

Badania eksperymentalne możliwości transmisji danych w budynkowej sieci elektroenergetycznej z wykorzystaniem modemów PLC HomePlug

Prof. dr hab. inż. Zdzisław PAPIR

Jest profesorem w KT AGH. Stopień doktora habilitowanego uzyskał w 1992 w Politechnice Gdańskiej. W latach 1991-1998 przebywał na stażach naukowych w Belgii, Włoszech, Niemczech oraz Stanach Zjednoczonych. W latach 1994-1995 pracował dla Polskiej Telewizji Kablowej jako dyrektor ds. rozwoju sieci. W latach 1995-2005 pracował dla miesięcznika IEEE Communication Magazine. Uczestniczy w realizacji projektów Komisji Europejskiej, głównie dotyczących systemów komunikacji multimedialnej.

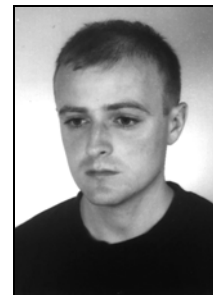
e-mail: papir@kt.agh.edu.pl



Mgr inż. Jacek WSZOŁEK

Ukończył Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki AGH w 2003 roku. W 2003 roku pracował w Tampere University of Technology, a następnie rozpoczął pracę na stanowisku asystenta w KT AGH. Uczestniczy w projektach europejskich i krajowych, dotyczących komunikacji bezprzewodowej.

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



Mgr inż. Jacek DAŃDA

W latach 1997-1998 pracował w firmach ComArch i Compnex jako programista. W 1998 ukończył studia na AGH i został zatrudniony jako asystent w KT AGH. Bierze udział w naukowych projektach krajowych oraz Komisji Europejskiej, dotyczących sieci dostępowych.

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



Dr inż. Marek NATKANIEC

Otrzymał tytuł doktora nauk technicznych na Wydziale Elektrotechniki Automatyki i Elektroniki AGH. Obecnie pracuje jako adiunkt w KT AGH. Bierze udział w projektach europejskich i krajowych dotyczących sieci WLAN.

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



Mgr inż. Krzysztof ŁOZIAK

W 1999 roku ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki AGH. Od 2001 roku jest zatrudniony jako asystent w KT AGH. Od 1999 roku bierze udział w naukowych projektach krajowych oraz Komisji Europejskiej, dotyczących głównie systemów łączności bezprzewodowej.

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



Mgr inż. Władysław ŁOZIAK

Ukończył studia w roku 1972 na wydziale Elektrotechniki i Automatyki AGH. Od 1973 r. pracuje w Katedrze Automatyki. Uczestniczy w pracach badawczych dotyczących jakości energii elektrycznej. Jest autorem i współautorem kilku patentów z dziedziny elektrotermii.

e-mail: loziak@agh.edu.pl



Streszczenie

Istnieje wiele kryteriów podziału sieci teleinformatycznych: ze względu na architekturę, zasięg działania, wykorzystywane medium transmisyjne. Dodatkowym kryterium klasyfikacji mogą być również czynniki ekonomiczne, takie jak koszt budowy infrastruktury sieciowej (np. koszty okablowania strukturalnego dla sieci typu Ethernet 100BaseT, kabla CATV, itp.) czy koszt podłączenia kolejnego odbiorcy. Najbardziej atrakcyjne ze względów ekonomicznych są te sieci, które nie wymagają inwestycji w postaci nowego okablowania (m.in. sieci bezprzewodowe WLAN), ewentualnie sieci, które są w stanie przyjąć nowe formaty transmisji (sieć telefoniczna – ADSL, sieć CATV – DOCSIS). W niniejszym artykule omówiony zostanie stosunkowo mało rozpowszechniony w Polsce sposób transmisji danych, wykorzystujący jako medium istniejące sieci elektroenergetyczne niskiego napięcia (~230V). Sieci te ze względu na powszechność instalacji elektroenergetycznej mogą w przyszłości stanowić konkurencję dla najbardziej rozpowszechnionych metod dostępu do Internetu bazujących na pętli abonenckiej oraz lokalnych sieci kablowych i bezprzewodowych WLAN. Ponadto ze względu na niezawodność transmisji mogą być stosowane jako rozwiązanie alternatywne do budowy przemysłowych sieci transmisji danych.

Słowa kluczowe: transmisja danych, sieci elektroenergetyczne, PLC, standard HomePlug.

Experimental Research of Data Transmission over Building Electrical Power Wiring Using PLC Homeplug Modems

Abstract

Telecommunications networks can be divided into different categories using many different criteria, such as the network architecture, coverage area, media types, etc. Economical aspects such as network installation cost or cost of connecting of a new customer could be considered as an additional network classification level (for example: Ethernet 100BaseT or CATV network structure cabling cost). The most attractive, from a business point of view is structural wiring or existing networks which can convey enhanced transmission formats (PSTN with ADSL, CATV with DOCSIS). In this paper a barely popular in Poland data transmission technique is presented. The described PLC technique takes an advantage of existing low-voltage (~230V) power lines as a data bearer. Ubiquitous power-line networks can be consider in the near future as a very competitive to a typical Internet access network based on customer's local loop or local area, fixed and wireless networks.

Keywords: data transmission, power wiring, PLC, HomePlug standard.

1. Wprowadzenie

Pierwsze próby z wykorzystaniem sieci elektroenergetycznych do transmisji danych podjęto już 160 lat temu [1], jednakże zadawalające efekty w postaci transmisji z szybkością powyżej 10 Mbit/s, uzyskano dopiero w połowie lat 90 ubiegłego wieku. Obecnie znanych jest wiele protokołów transmisji w sieciach elektroenergetycznych, określanych mianem transmisji PLC (ang. PowerLine Communications). W większości przypadków protokoły te wykorzystywane są do sterowania i sygnalizacji między urządzeniami elektroenergetycznymi, a nie do transmisji danych w sieciach komputerowych. Najbardziej znanym standardem wykorzystywanym podczas transmisji danych między urządzeniami wyposażonymi w interfejsy sieciowe NIC jest HomePlug. Standard HomePlug [1] definiuje protokół warstwy fizycznej i MAC. Wykorzystuje modulację OFDM [1,2] na poziomie warstwy fizycznej oraz technikę CSMA/CA na poziomie warstwy MAC. Obie te techniki są znane od wielu lat i są powszechnie stosowane w innych sieciach transmisji danych.

W chwili obecnej na rynku dostępne są modemy PLC zgodne ze standardem HomePlug, oferujące przepływność rzędu kilku do kilkunastu Mbit/s. Producenci tych urządzeń sugerują, że są one przede wszystkim przeznaczone do zastosowań w domach wielorodzinnych lub mieszkaniach i mogą służyć do budowy sieci domowej.

W niniejszym artykule przedstawiono rezultaty i wnioski płynące z badań modemów PLC, ukierunkowanych na zapewnienie efektywnej transmisji w środowisku odmiennym od zalecanego przez producentów, czyli w wielopiętrowych blokach mieszkalnych. Ponadto opisano zaobserwowane podczas badań zjawiska, które mają bezpośredni wpływ na zasięg i możliwość szerszego zastosowania tego typu urządzeń.

Badania modemów PLC podzielono na następujące etapy:

1. Zwiększanie liczby urządzeń PLC w jednym segmencie sieci.
2. Transmisja w trójfazowej instalacji elektrycznej.
3. Wpływ zakłóceń w sieciach elektroenergetycznych na transmisję PLC.
4. Zasięg transmisji w wydzielonym segmencie sieci elektroenergetycznej i w dużych budynkach.
5. Możliwości zwiększenia zasięgu transmisji PLC za pomocą urządzeń hybrydowych PLC – WLAN oraz mostków Ethernet.
6. Możliwości zastosowania modemów w blokach mieszkalnych oraz domach wielorodzinnych oraz możliwości transmisji PLC przez liczniki energii różnego typu stosowane w Polsce.

W punktach 2, 4 oraz 6 przedstawiono wyniki, które są nowatorskie z punktu widzenia transmisji PLC. Kolejne części artykułu opisują najważniejsze dane oraz wyniki z poszczególnych etapów badań, a także stosowane systemy pomiarowe. Ogólne wnioski płynące z badań zostały umieszczone w zakończeniu artykułu.

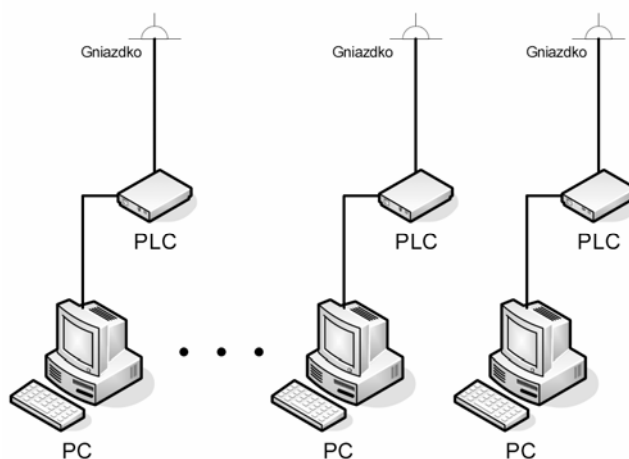
2. Zwiększanie liczby urządzeń PLC w jednym segmencie sieci

Zgodnie z informacjami producentów urządzeń PLC [3] zgodnych ze standardem HomePlug, powinny one współpracować ze sobą w obrębie jednego segmentu sieci elektroenergetycznej. Pod pojęciem segmentu należy rozumieć część instalacji elektroenergetycznej budynku, znajdującą się między transformatorem a punktami końcowymi sieci (np. gniazdko elektryczne). Należy tu zwrócić uwagę, że producenci często definiują ten segment jako odcinek między licznikiem energii elektrycznej w lokalu użytkownika a punktami końcowymi. Maksymalna liczba urządzeń PLC w jednym, współdzielonym segmencie sieci elektroenergetycznej wynosi ok. 253 [3, 4], przy czym dane mogą być transmitowane równocześnie przez nie więcej niż kilkanaście urządzeń.

Podczas przeprowadzonych badań szczególną uwagę zwrócono na:

- sposób i efektywność podziału pasma między wiele urządzeń PLC nadających równocześnie w jednym segmencie sieci elektroenergetycznej,
- możliwość transmisji w przypadku oddalonego modemu PLC, którego sygnał mógł być zagłuszony przez inne modemy położone blisko siebie.

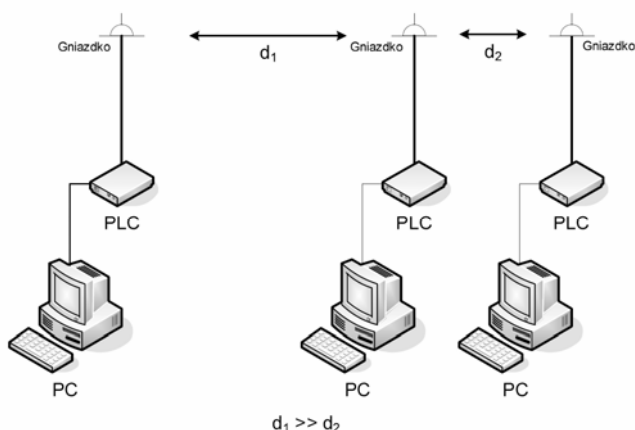
W pierwszym przypadku obserwacji poddano pojawienie się ewentualnych strat pasma w przypadku transmisji między wieloma modemami PLC. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Układ pomiarowy do badania strat pasma w przypadku transmisji między wieloma modemami PLC

Fig. 1. Measurements of bandwidth loss in case of multipoint PLC data transmission

W drugim przypadku starano się zaobserwować efekt tłumienia sygnału pochodzącego z oddalonego urządzenia PLC skierowanego do dwóch blisko położonych urządzeń PLC (rysunek 2).



Rys. 2. Układ pomiarowy do badania efektu tłumienia sygnału pochodzącego z oddalonego urządzenia PLC

Fig. 2. Measurement of signal attenuation sent by a distant PLC

Na podstawie obserwacji można stwierdzić brak niekorzystnych efektów, tzn.:

- modemy PLC dzielą pasmo równomiernie,
- nie zaobserwowano strat pasma (obniżania szybkości transmisji poniżej wartości wynikającej z równomiernego podziału) w przypadku równoczesnej transmisji z wielu urządzeń PLC,

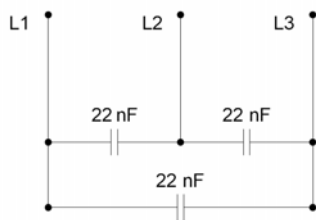
- nie zaobserwowano efektu wytłumienia słabego sygnału pochodzącego od odległego modemu PLC przez blisko położone modemy PLC z wysokim poziomem sygnału.

Z przeprowadzonych badań wynika, że modemy PLC zgodne ze standardem HomePlug dobrze nadają się do transmisji w konfiguracji wielopunktowej.

3. Transmisja w trójfazowej instalacji elektrycznej

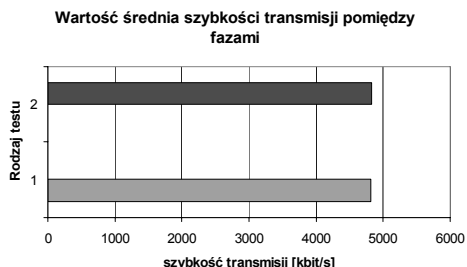
W opracowaniach dotyczących HomePlug i PLC, za najistotniejszy problem transmisji uważany jest podział sieci elektroenergetycznej na fazy zasilania oraz odseparowane, oddzielone transformatorami segmenty sieci zasilającej.

Jako jedyny możliwy sposób rozwiązania tego problemu wskazywano dotąd (stan na 2005 r.) wprowadzenie sprzęgacza faz (ang. phase coupler) między różnymi fazami zasilania i odseparowanymi segmentami sieci elektroenergetycznej. Konstrukcja sprzęgacza faz jest przedstawiona na rysunku 3, z którego wynika, że łączy on niezależne fazy zasilania pojemnościami rzędu dziesiątek nF, które stanowią zwarcie dla transmisji PLC, realizowanej na częstotliwościach od kilku do kilkunastu MHz. Pojemności tego rzędu istnieją również między poszczególnymi żyłami kabla zasilającego w przypadku długich doprowadzeń z transformatora do budynku.



Rys. 3. Schemat elektryczny sprzęgacza faz
Fig. 3. Electrical diagram of a phase coupler

Przeprowadzone badania udowodniły, że możliwa jest transmisja PLC między różnymi fazami zasilania z wykorzystaniem tych pojemności bez sprzęgacza faz. Szybkość transmisji z wykorzystaniem pojemności między fazami była zbliżona do szybkości transmisji z wykorzystaniem sprzęgacza faz.



Rys. 4. Wartość średnia szybkości transmisji pomiędzy fazami:
1 – z wykorzystaniem sprzęgacza faz, 2 – pojemności pomiędzy żyłami jednego kabla
Fig. 4. Average data transmission rate for a three phase wiring:
1 – using a phase coupler, 2 – without a phase coupler

Ponadto przeprowadzono badania polegające na próbie transmisji między odseparowanymi segmentami sieci elektroenergetycznej. Badania wykazały istnienie zjawiska umożliwiającego transmisję między fazami dzięki skrzyżowaniu żył kabli elektroenergetycznych, co przedstawiono na rysunku 4. Należy podkreślić, że między badanymi sieciami nie było żadnego połączenia galwanicznego, a wszystkie urządzenia pomiarowe były zasilane

z niezależnych źródeł zasilania (zasilacze awaryjne UPS). Rozsuniecie przewodów o odległość rzędu kilkunastu – kilkudziesięciu milimetrów prowadziło do zerwania transmisji. Ponieważ pojemności między żyłami kabli były pomijalnie małe, a częstotliwości transmisji dla PLC są rzędu MHz, zjawisko to jest najprawdopodobniej spowodowane propagacją radiową między żyłami kabli zasilających.



Rys. 5. Skrzyżowanie kabli umożliwiające transmisję PLC
Fig. 5. Wiring crossing that enables PLC transmission between wires

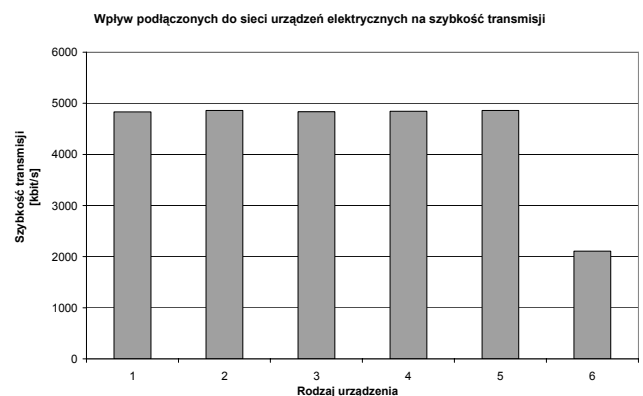
Wyniki tych badań wskazują, że separacja galwaniczna sieci elektroenergetycznych nie powinna stanowić przeszkody dla transmisji PLC.

4. Wpływ zakłóceń w sieciach elektroenergetycznych na transmisję PLC

W ramach tej części badań testowano wpływ następujących urządzeń na transmisję PLC:

- silniki elektryczne o mocy rzędu kilku kW,
- lodówki, kuchenki mikrofalowe i inne urządzenia AGD,
- komputery i urządzenia peryferyjne (w tym urządzenia sieciowe),
- zasilacze impulsowe,
- inne domowe urządzenia elektryczne (takie jak ekspres do kawy, ładowarki telefonów komórkowych, lampy itp.).

Przeprowadzone badania nie wykazały wpływu urządzeń elektrycznych na parametry transmisji PLC poza silnikami elektrycznymi dużej mocy (rzędu 5 kW i większej, stosowanych w urządzeniach przemysłowych), co przedstawiono na rysunku 6.

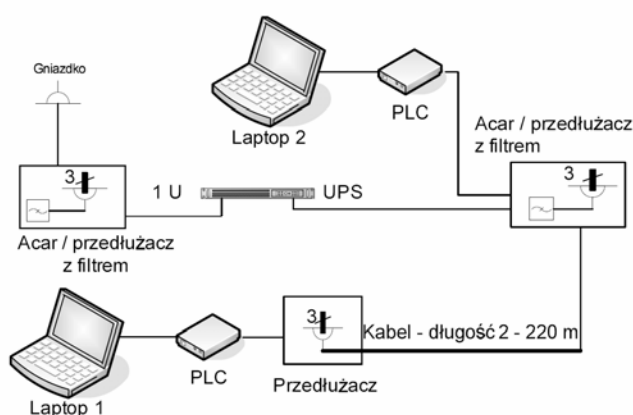


Rys. 6. Szybkość transmisji w zależności od rodzaju urządzenia elektrycznego wpiętego do sieci elektrycznej: 1 – dwa laptopy, 2 – dwa laptopy i czajnik elektryczny, 3 – dwa komputery PC z monitorami, 4 – czajnik elektryczny i lodówka, 5 – lodówka, 6 – silnik elektryczny o mocy 6 kW
Fig. 6. Data transmission rate for PLC signal suppressed by various electrical devices plugged into power wiring: 1 – two laptops, 2 – two laptops and electric pot, 3 – two PC computers, 4 – electric pot and refrigerator, 5 – refrigerator, 6 – 6 kW electric motor

Istotnym czynnikiem, wpływającym negatywnie na parametry transmisji PLC, były uszkodzenia sieci elektroenergetycznej i iskrzenia na stykach przewodów. Zjawiska te znacznie ograniczały lub wręcz uniemożliwiały transmisję PLC.

5. Zasięg transmisji PLC

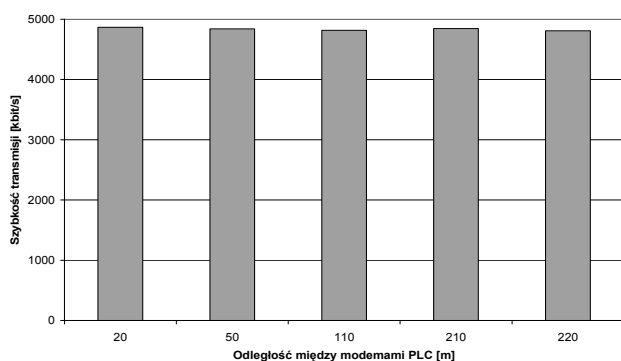
Producenci modemów PLC określają maksymalny zasięg transmisji PLC na około 200 m [3, 4]. Z przeprowadzonych badań wynika, że zasięg urządzeń PLC jest znacznie większy. Próba wyznaczenia maksymalnego zasięgu transmisji PLC w odseparowanym segmencie sieci elektroenergetycznej (budowa przedstawiona na rysunku 7) oraz w 10-piętrowym budynku biurowym AGH (zdjęcie na rysunku 8) wykazała, że transmisja PLC może objąć zasięgiem nawet bardzo duże budynki.



Rys. 7. Układ pomiarowy do badania zasięgu modemów PLC
Fig. 7. Measurements of the transmission range



Rys. 8. Budynek biurowy, w którym wykonywane były pomiary zasięgu modemów PLC
Fig. 8. The office building used for measurements of PLC transmission range

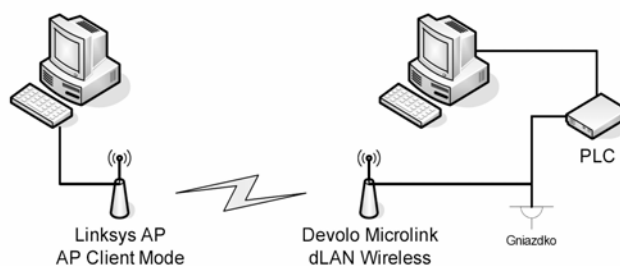


Rys. 9. Zmiany efektywnej szybkości transmisji w funkcji długości kabla między modemami PLC
Fig. 9. PLC data transmission rate for various wiring lengths between PLC modems

W badanym zakresie długości łączy w odseparowanym segmencie sieci elektroenergetycznej nie wykazano spadku przepływności (rysunek 9). W budynku biurowym transmisja PLC była możliwa między wszystkimi piętrami, przy czym szybkość transmisji zmieniała się niezależnie od odległości i zależała od jakości i obciążenia sieci elektroenergetycznej.

6. Możliwości zwiększenia zasięgu sieci PLC za pomocą urządzeń hybrydowych PLC-WLAN oraz mostków Ethernet

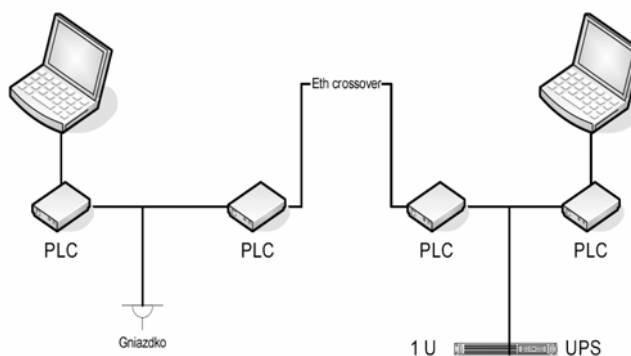
Na rynku, poza modemami PLC z interfejsem RJ45, dostępne są również hybrydowe urządzenia PLC z interfejsem WLAN opartym na CF (CompactFlash), pełniącym rolę Access Point'a. W ramach prac nad PLC zweryfikowano możliwość przedłużenia transmisji PLC za pomocą urządzeń hybrydowych PLC-WLAN oraz innych dostępnych rozwiązań. Przeprowadzone badania wskazały, że interfejs radiowy modemu PLC pracuje niestabilnie niezależnie od długości łączy, jeśli jest z nim zasocjowana zwykła karta WLAN PCMCIA lub PCI. Podczas eksperymentu stabilne łączy radiowe uzyskano dopiero po skonfigurowaniu bezprzewodowego punktu dostępowego firmy Linksys w trybie klienta i połączeniu go z interfejsem WLAN modemu PLC, co przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 10. Schemat mostka WLAN zbudowanego w oparciu o AP pracujący w trybie klienta

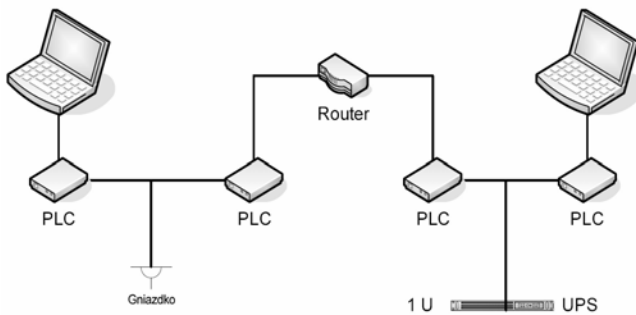
Fig. 10. The WLAN-PLC bridge diagram based on Access Point in a client mode

Poza łączy WLAN rozważono możliwości zwiększenia zasięgu transmisji PLC za pomocą sieci Ethernet. Próba zestawienia mostka Ethernet-PLC, przedstawionego na rysunku 11 zakończyła się niepowodzeniem. Modemy PLC nie pozwalają na przesłanie pakietu do podłączonego urządzenia, którego adres MAC nie jest adresem docelowym pakietu.



Rys. 11. Schemat mostka Ethernet – PLC
Fig. 11. The Ethernet – PLC bridge diagram

Przedłużenie transmisji PLC jest możliwe z wykorzystaniem routera, co przedstawiono na rysunku 12.

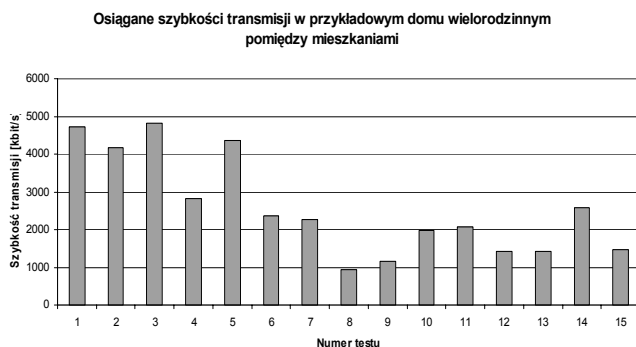


Rys. 12. Schemat mostka PLC - Router - PLC
Fig. 12. The PLC-Router-PLC bridge diagram

7. Zastosowanie modemów PLC w blokach mieszkalnych

Jednym z najważniejszych zagadnień rozwiązywanych w ramach badań modemów PLC, była kwestia transmisji PLC w blokach mieszkalnych i domach wielorodzinnych. Zgodnie z [3] transmisja PLC przez licznik energii elektrycznej miała być niemożliwa. W praktyce miało to uniemożliwić również transmisję PLC między mieszkaniami.

Prace badawcze w laboratoriach, kilku domach wielorodzinnych i blokach mieszkalnych wykazały, że stosowane liczniki energii elektrycznej nie stanowią bariery dla transmisji PLC. Ponadto okazało się, że transmisja danych przez licznik energii elektrycznej odbywa się z podobną szybkością jak w segmentach bez licznika. Wynika stąd, że PLC może stanowić rozwiązanie alternatywne dla innych technik bazowych umożliwiających dostęp do sieci Internet w budynkach mieszkalnych, takich jak CATV, WLAN czy LAN. Należy zaznaczyć, że technika PLC jest znacznie tańsza i prostsza w instalacji, niż typowa sieć lokalna Ethernet, a ponadto nie posiada ograniczeń typowych dla WLAN (tłumienie sygnału między piętrami jednego budynku uwarunkowane jego konstrukcją). Przykładowe szybkości transmisji osiągnięte pomiędzy różnymi mieszkaniami jednego domu wielorodzinnego przedstawiono na rysunku 13. Poszczególne testy wykonywane były pomiędzy modemami PLC wpiętymi do różnych gniazdek w badanych mieszkaniach.



Rys. 13. Osiągane szybkości transmisji w przykładowym domu wielorodzinnym pomiędzy mieszkaniami

Fig. 13. Data transmission rates for a block of flats between various flats

8. Zastosowane systemy pomiarowe

Do pomiarów parametrów transmisji PLC stosowano następujące urządzenia i oprogramowanie:

- modemy Microlink zgodne z HomePlug, z interfejsami Ethernet i WLAN,
- laptopy TOSHIBA i FUJITSU-SIEMENS z wbudowanymi kartami Ethernet,
- Access Point firmy Linksys, zgodny ze standardem 802.11b/g,
- oprogramowanie WSTTCP i aplikacje oparte na FTP – do pomiaru przepływności,
- ICMP (ping) – do pomiaru opóźnień,
- dedykowane oprogramowanie, przygotowane w Katedrze Telekomunikacji AGH do automatyzacji oraz archiwizacji pomiarów.

9. Wnioski

W przeprowadzonych badaniach wykazano między innymi, że indukcyjne liczniki energii elektrycznej i zasilanie modemów z różnych faz nie stanowią przeszkody dla transmisji PLC. Dzięki temu transmisja PLC może stanowić poważną konkurencję dla najpopularniejszych technik/rozwiązań transmisji danych w sieciach lokalnych, takich jak Ethernet i WLAN. Ponadto, dzięki braku konieczności instalacji dodatkowego okablowania oraz większemu zasięgowi w budynkach, niż jest osiągany dla sieci bezprzewodowych WLAN, urządzenia PLC mogą w wielu przypadkach wyprzeć te techniki z dużych budynków mieszkalnych i biurowych. Z pewnością można sformułować tezę, iż modemy PLC stanowią bardzo dobrą alternatywę dla budynków biurowych bez istniejącego okablowania strukturalnego.

Obecnie testowane są prototypy modemów HD-PLC (High-Definition PLC) [5], umożliwiające transmisję z maksymalną szybkością porównywalną z osiąganą w sieciach FastEthernet (100 Mbit/s) oraz WLAN 802.11g (54 Mbit/s). Wprowadzenie takich modemów na rynek uczyni technikę PLC jeszcze bardziej atrakcyjną dla potencjalnego odbiorcy (użytkownika mieszkania lub zarządcy nieruchomości).

10. Literatura

- [1] M. K. Lee, R. E. Newman, H. A. Latchman, S. Katar and L. Yonge: "HomePlug 1.0 Powerline Communication LANs – Protocol Description and Performance Results" INTERNATIONAL JOURNAL OF COMMUNICATION SYSTEMS Int. J. Commun. Syst. 2000.
- [2] HomePlug PowerLine Alliance: "HomePlug 1.0 Technology White Paper" http://www.homeplug.org/en/docs/HP_1.0_TechnicalWhitePaper_FINAL.pdf, San Ramon, 2006.
- [3] Devolo AG, „Microlink dLAN duo Manual”, Aachen, Germany, Marzec 2005.
- [4] Wodaplug "Wodaplug Powerlan WP-A001E Manual" http://www.wodaplug.com/download/doc/wodaplug_eng.pdf, 2006.
- [5] Consumer Electronics Powerline Communication Alliance: "FAQ HD-PLC" <http://hd-plc.org/FAQs/tabid/89/Default.aspx>, 2006.