

**Piotr LEŻYŃSKI<sup>1</sup>, Robert SMOLEŃSKI<sup>1</sup>, Adam KEMPSKI<sup>1</sup>,  
Jacek BOJARSKI<sup>2</sup>, Zbigniew SADOWSKI<sup>1</sup>**

Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Elektrycznej (1)  
Uniwersytet Zielonogórski, Wydział Matematyki, Informatyki i Ekonometrii(2)

## **Wpływ zaburzeń przewodzonych generowanych przez układy energoelektroniczne na niezawodność transmisji danych PLC**

**Streszczenie:** *W artykule przedstawiono zagadnienia związane z niezawodnością systemu komunikacji PLC w obecności zaburzeń przewodzonych wprowadzanych przez przekształtniki energoelektroniczne. Wykazano, że powszechnie stosowane, znormalizowane badania EMC dotyczące emisji zaburzeń przewodzonych nie pozwalają określić realnego wpływu generowanych zaburzeń na niezawodność transmisji danych.*

**Słowa kluczowe:** Kompatybilność Elektromagnetyczna, przekształtnik energoelektroniczny, transmisja danych, Power Line Communication (PLC)

### **Wprowadzenie**

Systemy komunikacji wykorzystujące sieć elektroenergetyczną PLC (Power Line Communication) postrzegane są przez dystrybutorów energii elektrycznej, jako jedno z rozwiązań komunikacyjnych, które ma zapewnić zdalny odczyt zużycia energii przez klientów [1, 2]. Do zalet komunikacji PLC zaliczyć można niskie koszty budowy systemu oraz fakt, że technologia ta daje prawdziwy obraz topologii sieci. Technologia PLC ma jednak inherentne wady, które mogą powodować problemy przy jej zastosowaniu w sieci elektroenergetycznych o niezdefiniowanych parametrach wysokoczęstotliwościowych oraz w obecności zaburzeń elektromagnetycznych, wprowadzanych do sieci przez przyłączone do niej urządzenia. Zagadnienie te nabierają szczególnego znaczenia w kontekście coraz powszechniejszego stosowania przekształtników energoelektronicznych w systemach elektroenergetycznych. Łączenie interfejsów energoelektronicznych, charakteryzujących się znacznymi poziomami generowanych zaburzeń elektromagnetycznych przewodzonych, z układami transmisji danych, wykorzystującymi sieć elektroenergetyczną jako medium transmisyjne, może prowadzić do znacznych problemów z zapewnieniem interoperacyjności systemu.

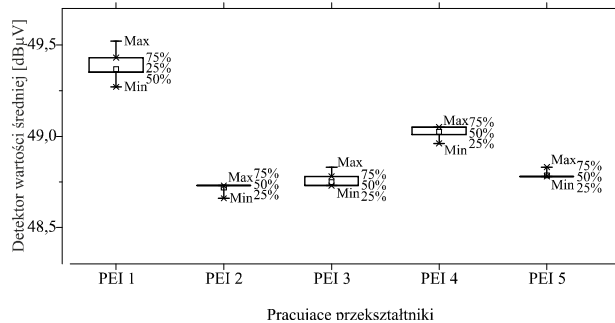
Celem artykułu jest analiza niezawodności systemu PLC w obecności przewodzonych zaburzeń elektromagnetycznych generowanych przez przekształtniki energoelektroniczne (PEE) w typowych dla nowoczesnych systemów elektroenergetycznych konfiguracjach, w których występują sumaryczne zaburzenia generowane przez wiele przekształtników oraz rozptył zaburzeń w rozległych obwodach sieci nn i SN.

### **Sumaryczne zaburzenia generowane przez grupę przekształtników energoelektronicznych**

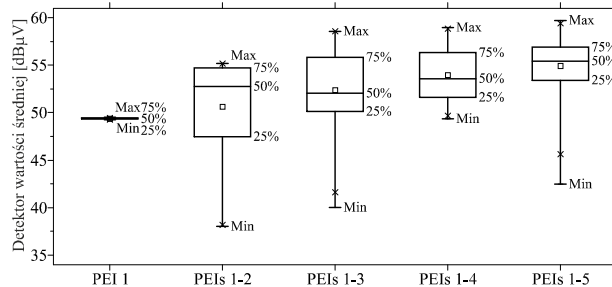
Przedstawione na rysunku 1 i 2 wykresy pudełkowe pokazują rozkłady wyników znormalizowanych pomiarów zaburzeń (detektorem wartości średniej), uzyskanych

## VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

w układzie składającym się z pięciu identycznych przekształtników DC/DC o mocy 1 kW. Każdy z tysiąca pomiarów, został uzyskany w znormalizowanym układzie pomiarowym składającym się z odbiornika zaburzeń oraz sztucznej sieci stabilizującej impedancję (LISN). Pomiary wykonano dla częstotliwości przełączania przekształtnika w znormalizowanym czasie pomiarowym, dla pomiarów detektorem finalnym, równym 1 s. W normach EMC dla oceny kompatybilności elektromagnetycznej przewiduje się wykonanie jednego pomiaru finalnego dla danej częstotliwości. Rozpiętość uzyskanych wyników pomiarów zaburzeń, generowanych przez pojedyncze przekształtniki (PEI 1, PEI 2, PEI 3, PEI 4, PEI 5), jest mniejsza od 1dB, jednakże w przypadku pracy grupowej dwóch (PEI 1-2), trzech (PEI 1-3), czterech (PEI 1-4) oraz pięciu (PEI 1-5) przekształtników uzyskane wyniki dla poszczególnych przypadków różnią się w sposób znaczący [3].



Rys. 1. Wykresy pudełkowe wyników pomiarów finalnych zaburzeń zmierzonych detektorem wartości średniej dla pojedynczych przekształtników.



Rys. 2. Wykresy pudełkowe wyników pomiarów finalnych zaburzeń zmierzonych detektorem wartości średniej dla grup przekształtników.

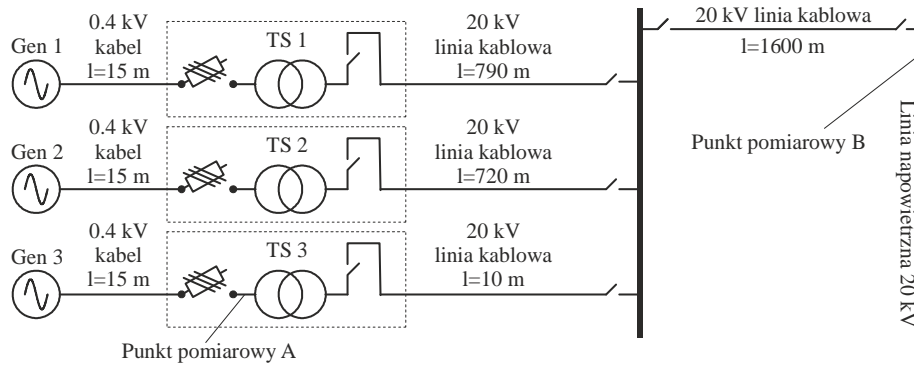
W prezentowanym przypadku dla pięciu przekształtników rozpiętość wyników pomiarów wynosiła 17dB. Różnice te spowodowane są wolnozmiennymi obwiedniami wynikającymi ze zdudnienia składowych harmoniczných zaburzeń wprowadzanych przez poszczególne przekształtniki. Otrzymane wyniki pokazują, że stosowane obecnie znormalizowane procedury pomiarowe są nieskuteczne w przypadku oceny sumarycznych zaburzeń wprowadzanych przez grupę przekształtników.

### Rozpływ zaburzeń generowanych przez farmę wiatrową w sieci nn i SN

We wcześniejszych pracach [4, 5] opisano rozpływ w sieci nn i SN zaburzeń generowanych przez przekształtnik przyłączony do sieci elektroenergetycznej po stronie niskiego napięcia.

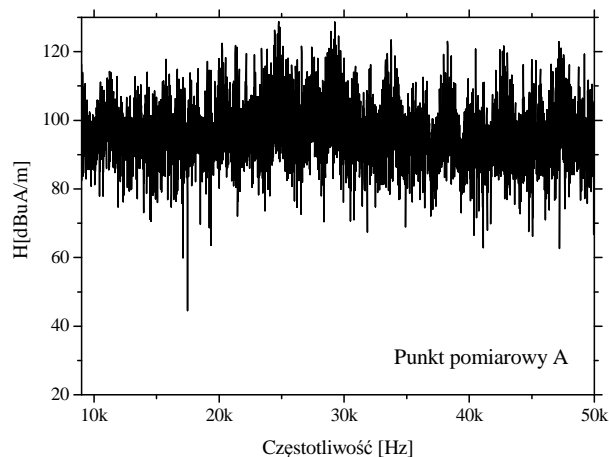
### VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

Na rysunku 3 przedstawiono schemat farmy wiatrowej składającej się z trzech siłowni typu HAWT o mocy 1,5 MW każda. Na schemacie zaznaczono miejsca pomiaru zaburzeń elektromagnetycznych. Punkty pomiarowe po stronie nn i SN oddalone są od siebie o ponad 1600 m.



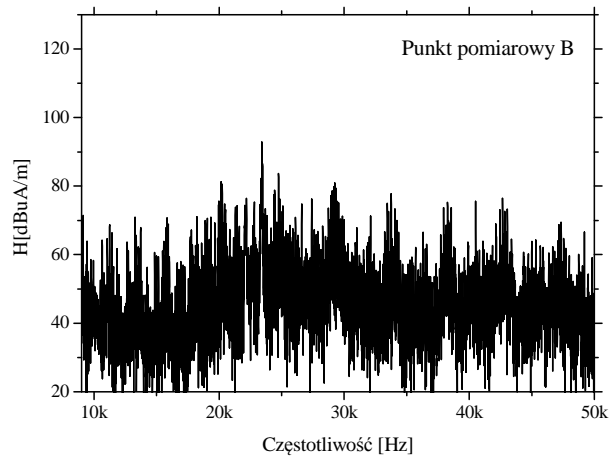
Rys.3. Schemat farmy wiatrowej z zaznaczonymi punktami pomiarowymi.

Pomiary zaburzeń w sieci SN wymusiły zastosowanie polowych metod pomiaru w paśmie zaburzeń przewodzonych. Pomiary natężenia składowej magnetycznej pola wykonano za pomocą aktywnej anteny pętlowej. Wyniki pomiaru zaburzeń w punkcie pomiarowym A i B przedstawiono na rysunkach 4 i 5. Przedstawione wyniki badań pokazują, że zaburzenia generowane w sieciach niskich napięć mogą rozprzestrzeniać się w rozległych obwodach również za pośrednictwem sieci kablowej SN. Charakterystyczne częstotliwości zaburzeń zmierzonych w rozdzielni po stronie nn (rysunek 4) są widoczne w widmie zaburzeń zmierzonych pod linią napowietrzną SN w odległości przekraczającej 1600 m (rysunek 5).



Rys.4. Widmo natężenia pola magnetycznego generowanego przez siłownię wiatrową, zmierzone w punkcie A po stronie niskiego napięcia.

## VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014



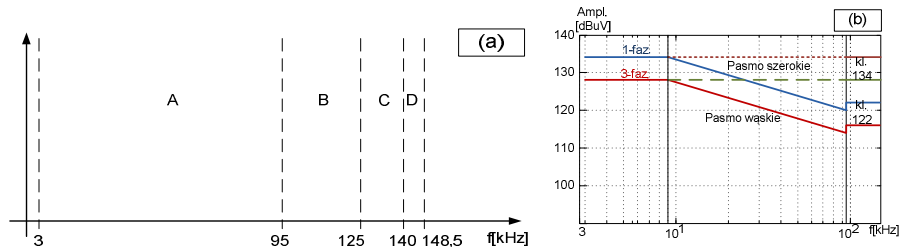
Rys.5. Widmo natężenia pola magnetycznego generowanego przez siłownię wiatrową, zmierzone pod linią napowietrzną w punkcie B.

### Opis standardu PLC

Komunikacja PLC występuje w kilku odmianach umożliwiających sterowanie i monitorowanie pracy urządzeń elektrycznych, oraz budowę lokalnych sieci komputerowych. Pomimo zróżnicowania technologii w Europie obowiązuje obecnie jeden standard PN-EN 50065-1 [6], który specyfikuje zakres częstotliwości dla transmisji PLC w sieciach nn (3kHz do 148,5 kHz). Zakres ten został podzielony na 4 subpasma (rysunek 6a). Pierwsze (dolne) subpasmo, to jest od 3 do 95 kHz, zostało zarezerwowane dla dostawców energii elektrycznej, do monitorowania i sterowania sieci rozdzielczej niskiego napięcia, w tym zużycia energii przez odbiorców. Górne subpasma powyżej 95 kHz w ogólności przewidziano do sterowania sprzętem podłączonym do sieci niskiego napięcia. W standardzie przewidziano maksymalne poziomy sygnałów jakie mogą być generowane do sieci przez nadajnik PLC. Wartości graniczne sygnałów, przedstawione na rysunku 6b, zależą od kilku czynników takich jak:

- klasa urządzenia 122 (środowisko domowe) lub 134 (środowisko przemysłowe)
- szerokości pasma sygnału szeroko pasmowy (>5kHz) i wąsko pasmowy (<5kHz)
- nadawanie 1-fazowe lub 3-fazowe

W standardzie tym nie określono typu modulacji PLC. Rekomendowane częstotliwości z niskich zakresów umożliwiają transmisję sygnałów na znaczne odległości. Jednakże niska częstotliwość sygnałów powoduje zmniejszenie szybkości transmisji danych.



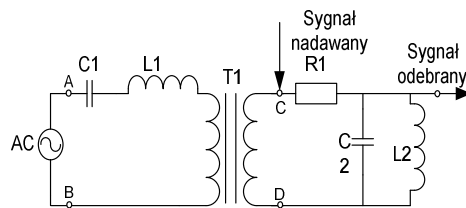
Rys.6. a ) Subpasma przewidziane dla komunikacji PLC b )poziomy dopuszczalne dla sygnałów stosowanych w komunikacji sieciowej

## VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

### **Transmisja sygnałów za pośrednictwem sieci elektroenergetycznej w obecności zaburzeń elektromagnetycznych przewodzonych**

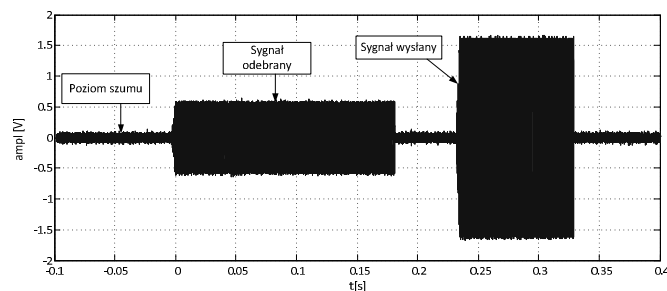
Podstawową analizę wykonano w najprostszym układzie komunikacji PLC, składającym się z jednego koncentratora danych i jednego modułu Smart-plug) oraz kanału transmisji. Dla zapewnienia dwukierunkowej komunikacji zarówno koncentrator danych jak i moduł Smart-plug mają wbudowane nadajniki jak i odbiorniki sygnału.

Ważną rolę we wszystkich urządzeniach PLC odgrywa układ sprzęgający, który łączy część sygnałową układu komunikacyjnego z siecią energetyczną. Układ sprzęgający w analizowanym przypadku jest dwuobwodowym filtrem pasmowym o sprzężeniu transformatorowym (rysunek 7). Zastosowanie takiego rozwiązania gwarantuje wysoką selektywność układu przy jednoczesnym zachowaniu zadanej szerokości pasma przepustowego.



Rys. 7. Układ sprzęgający sygnały z siecią zasilającą

Na rysunku 8 zaprezentowano oscylogram sygnału komendy, który został odebrany przez urządzenie (Smart-Plug) oraz sygnał potwierdzenia, który został wysłany do koncentratora danych, zmierzony po stronie sygnałowej OS w urządzeniu Smart-Plug. Sekwencja komunikacji składająca się z komendy razem z odpowiedzią w tym przypadku trwała łącznie ok. 330 ms. Sygnał odebrany ma ponad dwukrotnie niższą amplitudę niż sygnał wysłany, co wynika z tłumienności kanału transmisji oraz charakterystyki układów sprzęgających. W czasie, gdy sygnały komunikacyjne nie są przesyłane, zaobserwować można szumy na poziomie ok. 60mV (95dBuV). Komunikacja w takim układzie przebiega pomyślnie; nie obserwuje się błędów transmisji.



Rys. 8. Sygnały komunikacji PLC po stronie sygnałowej

W dalszej części badań wykonano pomiary sygnałów transmisji PLC w obecności przewodzonych zaburzeń elektromagnetycznych. Źródłem zaburzeń był czterokwadrantowy przemiennik, pracujący w pomieszczeniu oddalonym o ok. 8 metrów od laboratorium, w którym testowano układy z komunikacją PLC. Obydwa opisane pomieszczenia zasilane były ze wspólnej rozdzielni.

### VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

Po podłączeniu przekształtnika jakość komunikacji PLC uległa znacznemu pogorszeniu. Koncentrator pomiarowy wysyłał sygnały komend do urządzenia Smart-plug, jednak tylko nieliczne komendy zostały prawidłowo odczytane. Mimo że, po odczycie nielicznych komend Smart-plug generował odpowiedź potwierdzającą odebranie sygnału, układ koncentratora najczęściej nie był w stanie odebrać tej odpowiedzi, co doprowadziło do błędów w nadzorującym systemie informatycznym.

Na rysunku 9 przedstawiono przebieg napięcia po stronie OS urządzenia Smart-plug dla komunikacji PLC zakłócaną przez przemiennik częstotliwości (jeden z nielicznych przypadków odebrania sygnału). Po załączeniu przemiennika poziom maksymalny odbieranych zaburzeń (szumów) wzrósł z 60mV do ok 250mV (107dB $\mu$ V). Jednocześnie sygnał odbierany na wyjściu układu sprzęgającego obniżył się do poziomu ok 400mV (119dB $\mu$ V). Oznacza to, że sygnał zakłócający osiągnął poziom mocno zbliżony do poziomu sygnału użytecznego.

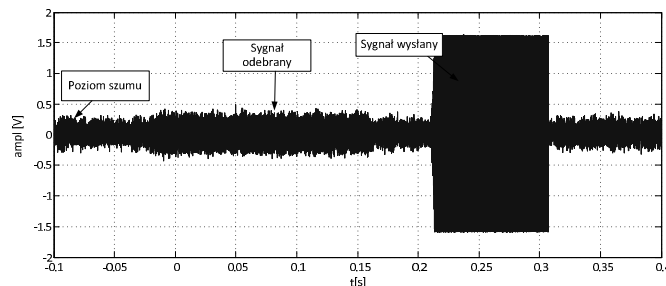
Kluczowym parametrem "jakości komunikacji" w systemach komunikacyjnych jest współczynnik SNR określający stosunek mocy sygnału użytecznego do mocy zaburzeń

$$SNR_{dB} = 20 \log \left( \frac{A_s}{A_z} \right) = A_{s[dB\mu V]} - A_{z[dB\mu V]}$$

(1)

gdzie:  $A_s$ - amplituda sygnału użytecznego  $A_z$ - amplituda zaburzeń.

Zgodnie z pracami [7-9], w których analizowano wpływ poziomu szumów na skuteczność komunikacji PLC, komunikacja przebiega pomyślnie jeśli współczynnik  $SNR_{dB} > (20-30)$ dB. W analizowanym przypadku odstęp sygnał szum wyniósł zaledwie 12dB.



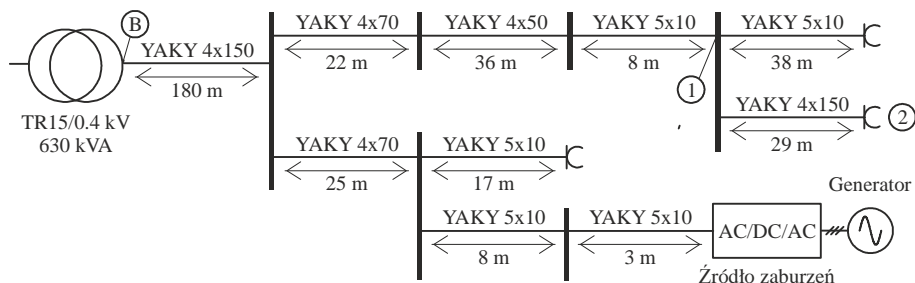
Rys.9. Sygnały komunikacji PLC po stronie sygnałowej po włączeniu przekształtnika

Przyczyną obniżenia wskaźnika SNR i w konsekwencji pogorszenia jakości komunikacji są dwa zjawiska:

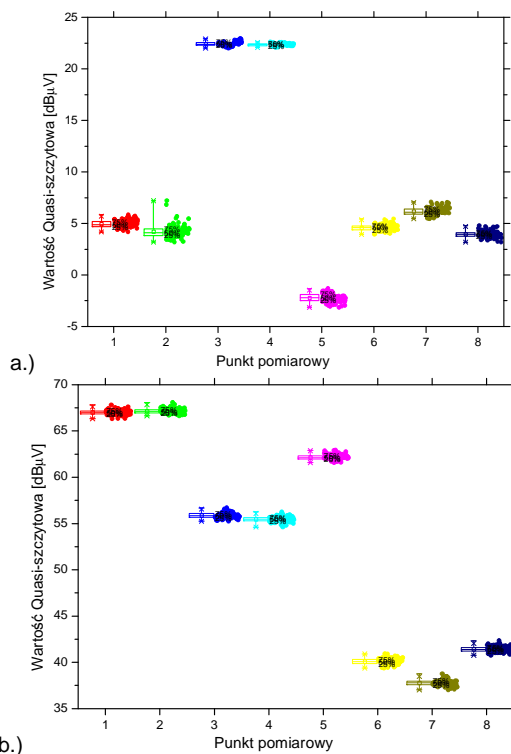
- zmiana transmitancji toru sygnału PLC w sieci elektroenergetycznej w obecności przekształtnika,
- pojawienie się zaburzeń o dużym poziomie.

Dodatkowo wykonano badania wpływu zaburzeń wprowadzanych przez czterokwadrantowy przemiennik częstotliwości na czas transmisji danych w dwóch punktach sieci [10]. Na rysunku 11 przedstawiono rozkłady wyników wielokrotnych pomiarów zaburzeń zmierzonych w poszczególnych punktach pomiarowych zaznaczonych na rysunku 10 dla włączonego i wyłączonego przekształtnika.

### VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014



Rys.10. Schemat instalacji hali laboratoryjnej.



Rys.11. Rozkłady wartości quasi-szczytowych zaburzeń dla: a.) wyłączonego przekaźnika, b.) włączonego przekaźnika.

Uzyskane wyniki pokazują, że zaburzenia wprowadzane przez przekaźnik w punkcie „A” powodują wzrost zaburzeń o ponad 20dB, w stosunku do zaburzeń tła funkcjonującej hali, we wszystkich punktach pomiarowych.

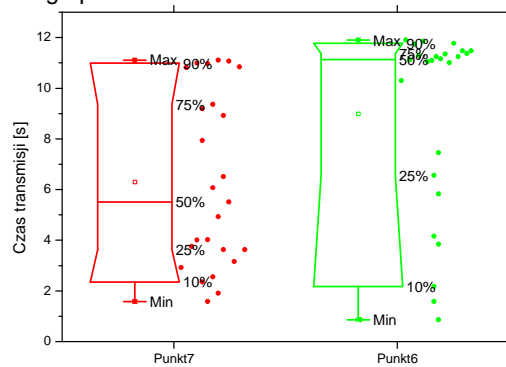
Zaobserwowano również wpływ zaburzeń generowanych przez przekaźnik na czas transmisji ramki danych w komercyjnym układzie wykorzystującym standard PLC z modulacją QPSK (Quadrature Phase Shift Keying).

Czas transmisji ramki danych przy wyłączonym przekaźniku wynosił 7 ms. Włączenie przekaźnika w punkcie „A” spowodowało znaczne wydłużenie czasów transmisji pomiędzy dwoma urządzeniami wykorzystującymi standard PLC. Rozkłady

## VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

czasów transmisji w punktach 1 i 2 przedstawiono na rysunku 12. Tak znaczne wydłużenie czasów transmisji spowodowane zaburzeniami wprowadzanymi przez przekształtnik pracujący w znacznej odległości może być przyczyną problemów z zapewnieniem interoperacyjności systemów. Problemy z uzyskiwaniem teoretycznych przepustowości standardu PLC są często spotykane w praktyce. Zdaniem autorów istotne znaczenie, oprócz niedostosowania instalacji do transmisji sygnałów wielkiej częstotliwości, mają zaburzenia elektromagnetyczne wprowadzane przez przekształtniki energoelektroniczne.

Na rysunku 12 przedstawiono rozkłady wyników wielokrotnych pomiarów zaburzeń zmierzonych w poszczególnych punktach pomiarowych zaznaczonych na rysunku 10 dla włączonego i wyłączanego przekształtnika.



Rys.12. Wykresy pudełkowe czasów transmisji w standardzie PLC w obecności zaburzeń generowanych przez przekształtnik.

### **Podsumowanie**

Przedstawione w pracy wyniki badań eksperymentalnych pokazują, że stosowane obecnie do oceny kompatybilności elektromagnetycznej znormalizowane procedury pomiarowe są niewystarczające dla oceny sumarycznych zaburzeń generowanych przez wiele przekształtników.

Wyniki badań eksperymentalnych wykazały, że zaburzenia elektromagnetyczne przewodzone generowane przez przekształtniki energoelektroniczne przyłączone do sieci nn mogą się rozprzestrzeniać w rozległych obwodach obejmujących sieć nn i SN.

Znaczne poziomy zaburzeń elektromagnetycznych, generowanych przez przekształtniki energoelektroniczne, w paśmie dedykowanym transmisji PLC, mogą powodować występowanie błędów transmisji danych, pomimo zastosowania w urządzeniach PLC wąskopasmowych filtrów wejściowych. Przedstawione wyniki badań eksperymentalnych pokazują, że rozwiązanie problemów związanych z niezawodnością transmisji danych PLC w sieciach elektroenergetycznych zawierających interfejsy energoelektroniczne może być kluczowym aspektem warunkującym rozwój współczesnych systemów elektroenergetycznych.

### **Bibliografia**

1. DSO priorities for smart grid standardisation, January 2013 <http://www.eurelectric.org>
2. G. Stefano, A. Scaglione, Z. Wang, "For the grid and through the grid: The role of power line communications in the smart grid". *Proceedings of the IEEE*, pp. 998-1027, 2011.



### **VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014**

3. J. Bojarski, R. Smolenski, A. Kempski, P. Lezynski, "Pearson's random walk approach to evaluating interference generated by a group of converters", *Applied Mathematics and Computation*, vol. 219, no. 12, pp. 6437–6444, Feb 2013.
4. R. Smolenski, M. Jarnut, G. Benysek, A. Kempski, "AC/DC/DC Interfaces for V2G Applications-EMC Issues", *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 60, no. 3, pp. 930–935, 2013.
5. R. Smoleński, A. Kempski, T. Tarczewski, „Wnikanie do sieci rozdzielczych SN zaburzeń elektromagnetycznych przewodzonych generowanych przez przekształtniki energoelektroniczne w sieciach nn”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 6, s. 147-150, 2010.
6. PN-EN 50065-1:2012 Transmisja sygnałów w sieciach elektrycznych niskiego napięcia w zakresie częstotliwości od 3 kHz do 148,5 kHz -- Część 1: Wymagania ogólne, zakresy częstotliwości i zaburzenia elektromagnetyczne.
7. K. Podlejski, M. Żołądek, „Modelowanie transmisji danych w sieciach niskiego napięcia”, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały*, s. 550-556, 2010.
8. G. N. Srinivasa Prasanna, A. Lakshmi, S. Sumanth, V. Simha, J. Bapat, G. Koomullil, "Data communication over the smart grid. Power Line Communications and Its Applications", *ISPLC 2009. IEEE International Symposium on. IEEE*, 2009.
9. V. Gungor, D. Sahin, T. Kocak, S. Ergut, C. Buccella, C. Cecati, G. Hancke, "Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards", *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, vol. 7, no. 4, pp. 529–539, Nov 2011.
10. R. Smoleński, J. Bojarski, P. Leżyński, A. Kempski, K. Cieniak, Z. Sadowski „Wpływ zaburzeń elektroenergetycznych przewodzonych generowanych przez interfejsy energoelektroniczne na niezawodność transmisji danych” *Sterowanie w Ergoelektronice i Napędzie Elektrycznym - SENE 2013*, 2013

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/03/N/ST7/00445

---

#### **Autorzy:**

Mgr inż. Piotr Leżyński, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Elektrycznej, ul. Podgórna 50, 65-246 Zielona Góra, E-mail: [p.lezynski@iee.uz.zgora.pl](mailto:p.lezynski@iee.uz.zgora.pl)  
Dr hab. inż. Robert Smoleński, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Elektrycznej, ul. Podgórna 50, 65-246 Zielona Góra, E-mail: [r.smolenski@iee.uz.zgora.pl](mailto:r.smolenski@iee.uz.zgora.pl)  
Dr hab. inż. Adam Kempski, prof. UZ, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Elektrycznej, ul. Podgórna 50, 65-246 Zielona Góra, E-mail: [a.kempski@iee.uz.zgora.pl](mailto:a.kempski@iee.uz.zgora.pl)  
Dr Jacek Bojarski Uniwersytet Zielonogórski, Wydział Matematyki, Informatyki i Ekonometrii, ul. prof. Z. Szafrana 4a, 65-516 Zielona Góra, E-mail: [j.bojarski@wmie.uz.zgora.pl](mailto:j.bojarski@wmie.uz.zgora.pl)  
mgr inż. Zbigniew Sadowski, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Elektrycznej, ul. Podgórna 50, 65-246 Zielona Góra, E-mail: [sadowskizbigniew@gmail.com](mailto:sadowskizbigniew@gmail.com)