

Robert SMOLEŃSKI<sup>1</sup>, Adam KEMPSKI<sup>1</sup>,  
Tomasz TARCZEWSKI<sup>2</sup>

Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Elektrycznej (1)  
Enea S.A., Rejon Energetyczny Krosno Odrzańskie (2)

## Wnikanie do sieci rozdzielczych SN zaburzeń elektromagnetycznych przewodzonych generowanych przez przekształtniki energoelektroniczne w sieciach nn

**Streszczenie.** W artykule przedstawione zostały wyniki badań eksperymentalnych dotyczących rozprzysygu zaburzeń elektromagnetycznych przewodzonych w sieciach niskich i średnich napięć. Wyniki badań pokazują, że zaburzenia przewodzone generowane po stronie niskiego napięcia przenoszą się za pośrednictwem pojemnościowych sprzężeń na stronę średniego napięcia i mogą być obserwowane w odległych punktach pod napowietrznymi liniami SN.

**Abstract.** In the paper the results of the investigations concerning the flow of EMI in LV and MV grids have been presented. The results showed that conducted EMI generated in LV grid can be transferred by means of parasitic couplings into MV network and can be observed in distant points under overhead MV lines. (Penetration of conducted EMI generated by power electronic converters in LV grid into MV distribution network).

**Słowa kluczowe:** kompatybilność elektromagnetyczna, zaburzenia przewodzone, przemiennik częstotliwości, linia napowietrzna SN.

**Keywords:** electromagnetic compatibility, conducted interferences, frequency converter, MV overhead line.

### Wstęp

Tendencja do pozyskiwania energii ze źródeł lokalnych, a w szczególności ze źródeł odnawialnych, obecna w regulacjach administracyjno-prawnych Unii Europejskiej, powoduje, że korzystanie z takiej energii wymagać będzie stosowania znacznej liczby układów energoelektronicznych, w celu dopasowania jej parametrów do wymagań standardów jakościowych.

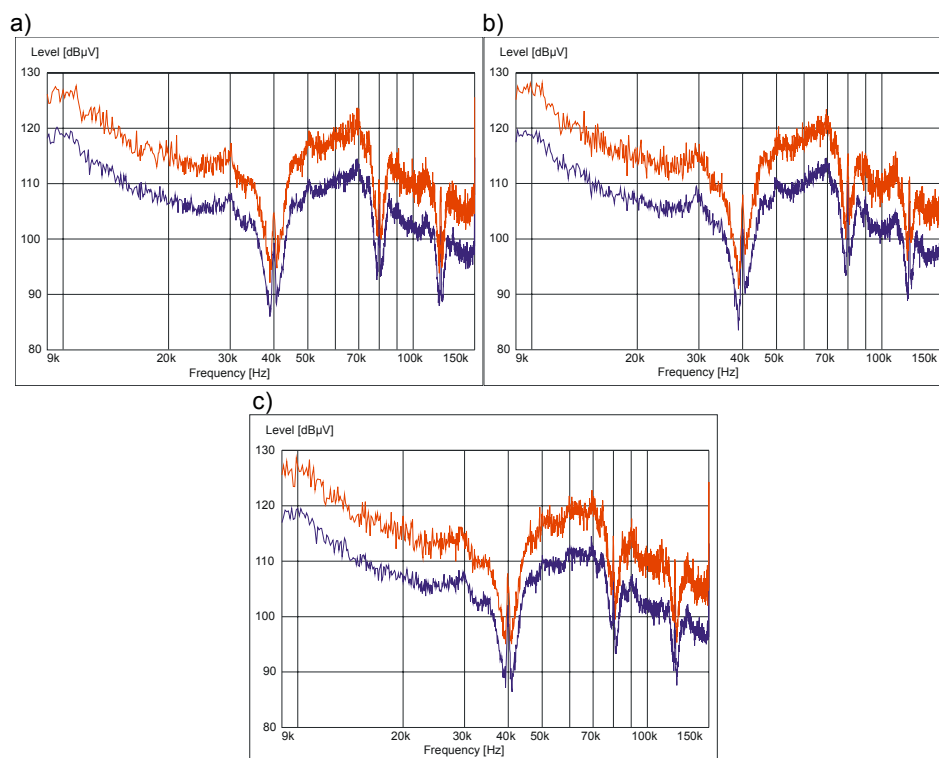
Kumulacja źródeł znacznych zaburzeń w.cz. na niewielkim obszarze oraz możliwość oddziaływania przekształtników wzajemnie na siebie i inne urządzenia zainstalowane w systemie powoduje, że w systemach rozproszonych [1] zawierających przekształtniki energoelektroniczne nie mogą być pominięte zagadnienia związane z kompatybilnością elektromagnetyczną (EMC). Kompleksowe analizy EMC, uwzględniające całą złożoność pasożytniczych zjawisk elektromagnetycznych, nie nadążają jednak za żywiołowym rozwojem zastosowań przekształtników w systemach rozproszonych.

Badania zaburzeń przewodzonych ograniczają się do badań pojedynczych urządzeń w znormalizowanych układach pomiarowych. Rzadko wykonuje się pomiary zaburzeń w miejscu zainstalowania urządzeń w sieciach niskiego napięcia a pomiary zaburzeń dla sieci SN są pomijane. Sieci SN mogą jednak stanowić drogę rozprzestrzeniania się zaburzeń w rozproszonych systemach generacji i przekształcania energii elektrycznej.

### Zaburzenia przewodzone czterokwadrantowego przemiennika częstotliwości

Do badań rozptyłu zaburzeń elektromagnetycznych przewodzonych w sieciach niskich i średnich napięć wytypowano komercyjnie dostępny czterokwadrantowy napęd asynchroniczny, składający się z przemiennika częstotliwości o mocy 25 kVA zasilającego silnik klatkowy (10 kW, 2 pary biegunów).

Wybór ten podyktowany był powszechnym stosowaniem tej topologii w systemach rozproszonych oraz znacznym poziomem generowanych zaburzeń o specyficznym kształcie widma. Widmo zaburzeń przewodzonych tego układu w paśmie CISPR A dla biegu jałowego, obciążenia i pracy generatorowej, przedstawiono na rysunku 1. Zaburzenia generowane przez przekształtnik nie zależą od kwadrantu pracy maszyny, ponieważ impedancja w.cz. obwodu rozptyłu zaburzeń oraz wysokoczęstotliwościowe parametry modulacji i szybkości narastania napięcia pozostają we wszystkich stanach pracy niezmiennie [2-4].



Rys.1. Zaburzenia przewodzone przekształtnika czterokwadrantowego w paśmie CISPR A: a) bieg jałowy, b) obciążenie, c) praca generatorowa

Obwiednia przedstawionych na rysunku 1 wyników pomiarów w paśmie CISPR A wskazuje na obecność zaburzeń oscylacyjnych tłumionych o częstotliwości ok. 70 kHz. W niskoczęstotliwościowej części widma zaburzeń, obserwuje się również charakterystyczne piki przy częstotliwościach będących wielokrotnością częstotliwości 40 kHz. Odpowiadają one częstotliwości sygnału synchronizującego przełączenia tranzystorów oraz częstotliwości rezonansowej filtra wejściowego.

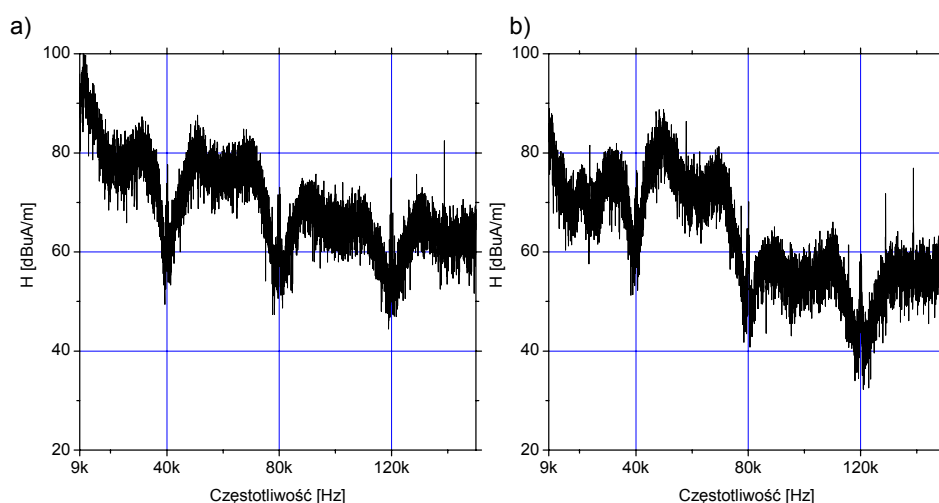
Przedstawione we wcześniejszych pracach wyniki badań [3, 4], zarówno w dziedzinie częstotliwości jak i w dziedzinie czasu, wskazują, że w systemie takim obecne

## VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

są dwa źródła zaburzeń, jedno po stronie sieciowej przekształtnika, a drugie po stronie silnikowej. Zaburzenia po stronie sieci, szczególnie w paśmie CISPR A są determinowane parametrami wewnętrznymi przekształtnika takimi jak częstotliwość przełączeń łączników prostownika oraz częstotliwość rezonansowa filtru i główny mod oscylacyjny zaburzeń wspólnych (CM) [2, 6-12]. Powoduje to, że zaburzenia wprowadzane do sieci przez ten przekształtnik są stosunkowo łatwo identyfikowalne.

### Pomiary zaburzeń przewodzonych w liniach napowietrznych SN

Na rysunku 2 przedstawiono wyniki pomiaru składowej magnetycznej pola w stacji transformatorowej po stronie niskiego i średniego napięcia.



Rys.2. Widmo natężenia pola magnetycznego: a) po stronie pierwotnej transformatora dla włączonego przekształtnika, b) po stronie wtórnej transformatora dla włączonego przekształtnika

Pomiary w sieciach SN wymusiły zastosowanie metod polowych do pomiaru zaburzeń z pasma zaburzeń przewodzonych (9 kHz - 30 MHz). W badaniach zastosowano aktywną antenę pętlową. Przedstawione we wcześniejszej pracy [5] wstępne wyniki pomiarów pokazały, że zaburzenia wprowadzane przez przekształtnik przenoszą się za pośrednictwem sprzężeń pasożytniczych (niezgodnie z przekładnią transformatora) na stronę średniego napięcia. Badania wykonano w stacji transformatorowej typu miejskiego. Napęd asynchroniczny z przekształtnikiem czterokwadrantowym zasilono po stronie nn transformatora o mocy 160 kVA.

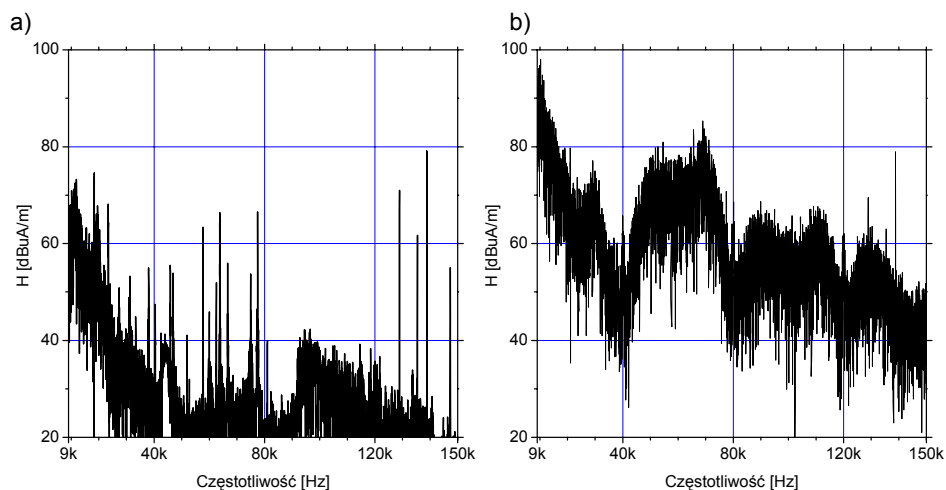
Dalsze badania wykonano pod linią napowietrzną SN. Przedstawione na rysunku 3 widma składowej magnetycznej pola zmierzono w odległości 20 m od stacji transformatorowej. Antenę orientowano wzdłuż linii, co zapewniało maksymalne wskazania poziomu zaburzeń z pasma (9 kHz – 10 MHz) - mierzonych w polu bliskim [13]:

$$l = \lambda / 2\pi.$$

(1)

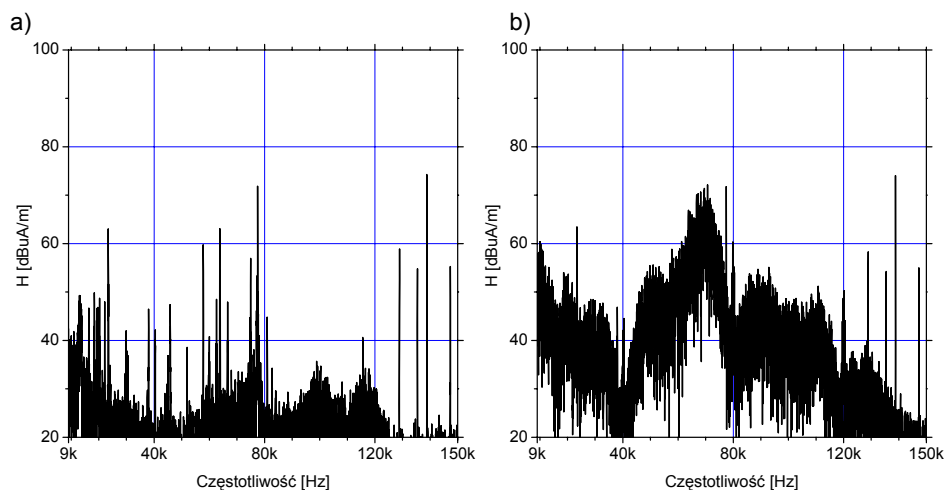
Zaprezentowane wyniki przedstawiają: a.) zaburzenia tła (zaburzenia przy wyłączonym przekształtniku) oraz b.) zaburzenia zmierzone podczas pracy

przekształtnika. Wzrost natężenia składowej magnetycznej pola oraz typowy kształt widma wskazują na obecność w linii zaburzeń generowanych przez przekształtnik.



Rys.3. Widmo natężenia pola magnetycznego pod linią SN w odległości 20 m od stacji transformatorowej: a) przekształtnik wyłączony, b) przekształtnik włączony

Drugi punkt pomiarowy zlokalizowany był pod linią SN w odległości 1300 m od stacji transformatorowej. Wyniki pomiarów składowej magnetycznej zaburzeń tła oraz zaburzeń przy włączonym przekształtniku przedstawiono na rysunku 4.



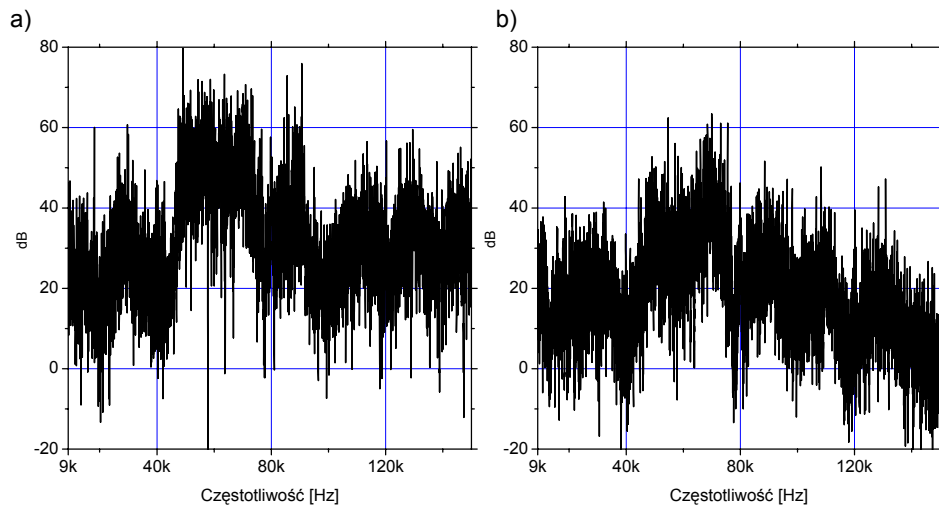
Rys.4. Widmo natężenia pola magnetycznego pod linią SN w odległości 1300 m od stacji transformatorowej: a) przekształtnik wyłączony, b) przekształtnik włączony

Zarówno zaburzenia tła jak i zaburzenia zmierzone podczas pracy przekształtnika są niższe od zaburzeń zaobserwowanych w pobliżu stacji transformatorowej. Znaczny wzrost poziomu zaburzeń podczas pracy przekształtnika oraz typowy kształt widma zaburzeń (obwiednia wskazująca na obecność przebiegów oscylacyjnych tłumionych o częstotliwości ok. 70 kHz oraz zaburzenia odpowiadające

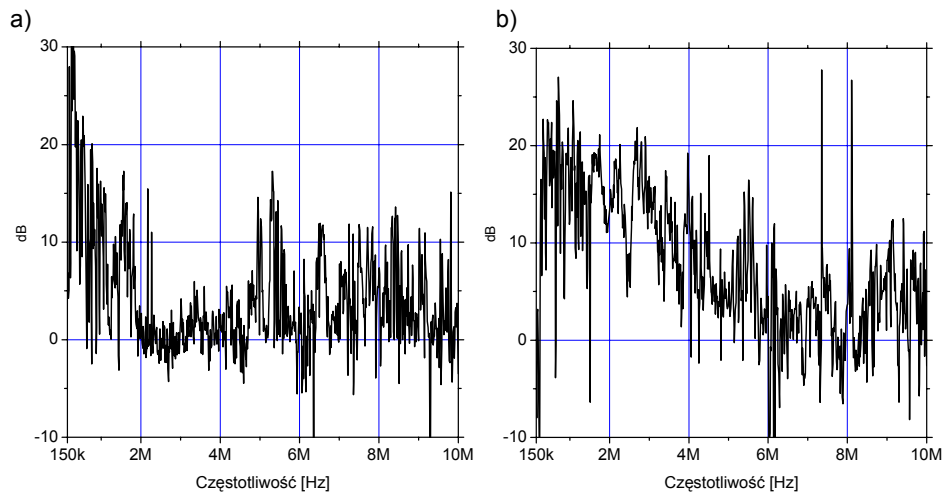
## VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

częstotliwości łączy 40 kHz) wskazują jednak, że zaburzenia generowane przez przekształtniki energoelektroniczne w sieci nn mogą rozprzestrzeniać się w rozległych obwodach sieci napowietrznych SN.

W celu łatwiejszej identyfikacji zaburzeń wprowadzanych przez przekształtnik, od widma zaburzeń przy włączonym przekształtniku odjęto zaburzenia tła. Różnicę zaburzeń zmierzonych pod siecią SN i zaburzeń tła w obu punktach pomiarowych przedstawiono na rysunku 5.



Rys.5. Różnica zaburzeń zmierzonych pod siecią SN i zaburzeń tła: a) w odległości 20 m od stacji transformatorowej, b) w odległości 1300 m od stacji transformatorowej



Rys.6. Różnica zaburzeń zmierzonych pod siecią SN i zaburzeń tła: a) w odległości 20 m od stacji transformatorowej, b) w odległości 1300 m od stacji transformatorowej

Przedstawione wyniki pokazują, że włączenie do sieci nn przekształtnika o znacznym poziomie generowanych zaburzeń może powodować 40-60dB (100-1000 krotny) wzrost poziomu zaburzeń w stosunku do zaburzeń tła. Dla charakterystycznych częstotliwości wprowadzanych przez przekształtnik obserwuje się słabienie zaburzeń o około 10-20dB (3-10 razy) na długości linii. Należy zaznaczyć, że ze względu na efekty falowe (powstawanie fal stojących) [13, 14] wielkości te należy traktować, jako orientacyjne.

Największe tłumienie zaburzeń zarejestrowano przy najwyższych częstotliwościach pasma CISPR A. Na rysunku 6 przedstawiono różnicę zaburzeń zmierzonych pod siecią SN i zaburzeń tła w obu punktach pomiarowych dla pasma 150 kHz – 10 MHz. Włączenie przekształtnika powoduje zwiększenie poziomu zaburzeń o ok. 15-20dB (6 – 10 razy). Zaburzenia w paśmie wyższych częstotliwości są zazwyczaj mocniej tłumione. Zaznaczyć jednak należy, że zaburzenia generowane przez przekształtnik w tym zakresie częstotliwości są również niższe.

### **Wnioski**

Specyfika układów energoelektronicznych oraz ich rola w systemie elektroenergetycznym powodują, że pracują one zazwyczaj w zmiennych konfiguracjach obwodów wejściowych i wyjściowych. Tradycyjne podejście do badań EMC, polegające na ograniczeniu się do badań zgodności wyrobów z normami zharmonizowanymi, okazuje się często niewystarczające dla zapewnienia kompatybilności systemu w miejscu zainstalowania [7].

Przedstawione wyniki badań pokazują, że zaburzenia generowane przez przekształtniki energoelektroniczne zainstalowane w sieciach nn mogą przenosić się za pośrednictwem sprzężeń pasożytniczych (niezgodnie z przekładnią transformatora) na stronę SN. Zastosowanie polowych metod pomiaru zaburzeń z pasma zaburzeń przewodzonych pozwala na badania ich rozprzyszczenia w liniach napowietrznych SN. Badania wykazały, że zaburzenia mogą się rozprzyszczać w rozległych obwodach a linie SN mogą stanowić część obwodów ich rozprzyszczenia.

Planowane w dalszych pracach analizy ilościowe muszą być poprzedzone seriami pomiarów w wielu punktach linii. Wyniki takich pomiarów pozwolą uwzględnić zjawiska falowe występujące w liniach. Autorzy planują również badania przenikania zaburzeń generowanych w obwodach nn do obwodów zasilanych z innych transformatorów stacyjnych połączonych liniami napowietrznymi SN.

### LITERATURA

- [1] Strzelecki R., Benysek G., Power electronics in smart electrical energy networks, *Springer-Verlag*, (2008)
- [2] Kempski A., Elektromagnetyczne zaburzenia przewodzone w układach napędów przekształtnikowych, *Oficyna Wydaw. Uniwersytetu Zielonogórskiego*, (2005)
- [3] Smoleński R., Kempski A., Kompatybilność elektromagnetyczna czterokwadrantowego napędu przekształtnikowego w zakresie emisji zaburzeń przewodzonych, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2007), nr. 9, 79-81
- [4] Kempski A., Smoleński R., Rozprzyszczenie zaburzeń generowanych przez czterokwadratowe przemienniki częstotliwości w sieciach lokalnych niskich napięć, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2008), nr. 4, 20-23
- [5] Kempski A., Smoleński R., Kompatybilność elektromagnetyczna układów energoelektronicznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2009), nr. 9, 164-171
- [6] Shen W., Wang F., Boroyevich D., Liu Y., Definition and acquisition of CM and DM EMI noise for general-purpose adjustable speed motor drives, *PESC'04*, (2004), 1028-1033 Aachen
- [7] Williams T., Armstron K., EMC for systems and installations, *Butterworth-Heinemann Ltd*

## **VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010**

- [8] Kempinski A., Smoleński R., Strzelecki R., Common mode current paths and their modeling in PWM inverter-fed drives, *PESC'02*, (2002), Cairns
- [9] Ogasawara S., Akagi H., Modeling and damping of high-frequency leakage currents in PWM inverter-fed AC motor drive systems, *IEEE Trans. on Ind. Appl.* 32 (1996), 1105-1114
- [10] Ogasawara S., Akagi H., An Active Circuit for Cancellation of Common Mode Voltage Generated by PWM Inverter, *PESC'97*, (1997), 1547-1553
- [11] Akagi H., Hasegawa H., Doumoto T., Design and performance of a passive EMI filter for use with voltage source PWM inverter having sinusoidal output voltage and zero common-mode voltage, *IEEE Trans. on Power Electr.* 19 (2004), 1069-1076
- [12] Akagi H., Doumoto T., A passive EMI filter for preventing high-frequency leakage current from flowing through the grounded inverter heat sink of an adjustable-speed motor drive system, *IEEE Trans. on Ind. Appl.* 41 (2005), 1215-1223
- [13] Magnusson P.C., Alexander G.C., Tripathi V.K., Weisshaar A., Transmission lines and wave propagation, *CRC Press*, (2001)
- [14] Skibinski G., Kerkman R., Leggate D., Pankau J., Schlegel D., Reflected wave modeling techniques for PWM AC motor drives, *Proc. IEEE Applied Power Electronics Conference*, (1998), 1021-1029

**Autorzy:** dr inż. Robert Smoleński Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Elektrycznej, ul. Licealna 9, 65-001 Zielona Góra, E-mail: [R.Smolenski@iee.uz.zgora.pl](mailto:R.Smolenski@iee.uz.zgora.pl);  
dr hab. inż. Adam Kempinski, prof. UZ, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Elektrycznej, ul. Licealna 9, 65-001 Zielona Góra, E-mail: [A.Kempinski@iee.uz.zgora.pl](mailto:A.Kempinski@iee.uz.zgora.pl);  
Tomasz Tarczewski, Enea S.A., Rejon Energetyczny Krosno Odrzańskie, ul. Bohaterów Wojska Polskiego 20, 66-600 Krosno Odrzańskie

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2011 jako projekt badawczy

