

Adam KEMPSKI
 UNIwersytet ZIELONOGÓRSKI
 INSTYTUT INŻYNIERII ELEKTRYCZNEJ

Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) zewnętrzna i wewnętrzna systemów zawierających przekształtniki energoelektroniczne

dr inż. Adam KEMPSKI

Dr inż. Adam Kempski ukończył studia wyższe na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej, gdzie w 1981 uzyskał stopień doktora nauk technicznych w zakresie Elektrotechnologii. Od 1982 roku pracuje w Instytucie Inżynierii Elektrycznej Uniwersytetu Zielonogórskiego, gdzie kieruje pracami Środowiskowego Laboratorium Kompatybilności Elektromagnetycznej. Obszarem jego szczególnych zainteresowań są zakłócenia elektromagnetyczne w układach energoelektronicznych.



Streszczenie

W pracy przedstawiono analizę problemów występujących w trakcie pomiarów oraz oceny kompatybilności elektromagnetycznej układów zawierających przekształtniki energoelektroniczne. Proponowana metodyka rozwiązywania problemów EMC w tych układach polega na lokalizacji źródeł i dróg rozprzestrzeniania się zakłóceń, na podstawie pomiarów w dziedzinie czasu i częstotliwości oraz ich analizy za pomocą modeli symulacyjnych.

Abstract

In this paper the problems of Electromagnetic Compatibility achieving and measurements in systems with power electronics converters has been presented. The proposed methodology of solving of EMC problems in such systems is based on a localization of sources and paths of interference currents. The analyzes have been done on the basis of instantaneous measurements in both the time and the frequency domain and simulation models.

1. Wstęp

Postęp w technologii półprzewodników energoelektronicznych (IGBT, MOSFET), który dokonał się w ostatnich latach, pozwolił na wprowadzenie nowych generacji, zaawansowanych technologicznie, półprzewodnikowych układów przełączających. Znaczne zwiększenie częstotliwości przełączania łączników umożliwiło, z jednej strony, wprowadzenie zaawansowanych technik sterowania, z drugiej zaś, spowodowało pojawienie się nowej klasy problemów, związanych z generacją i propagacją zaburzeń elektromagnetycznych w systemach zawierających przekształtniki energoelektroniczne.

Dążenie do ograniczenia strat łączeniowych i zapewnienia możliwie krótkich czasów martwych spowodowało konieczność znacznego skrócenia czasu narostu i opadania na-

pięcia (du/dt). To, z kolei, może być przyczyną pojawienia się w systemie zakłóceń elektromagnetycznych wysokiej częstotliwości, głównie wskutek pasożytniczych sprzężeń w samym przekształtniku oraz w układzie obciążenia. Większe szybkości przełączeń w nowych przekształtnikach wymagają, zatem, aktualizacji badań nad wytwarzaniem i rozprzestrzenianiem się zakłóceń¹ w systemach.

Zakłócenia elektromagnetyczne mogą rozprzestrzeniać się w systemie jako zakłócenia symetryczne (różnicowe - differential mode) lub zakłócenia asymetryczne (wspólne - common mode). Zazwyczaj groźniejsze i trudniejsze do opanowania są zakłócenia wspólne (CM).

2. Analizy EMC

Normy kompatybilnościowe w zakresie zaburzeń przewodzonych dotyczą głównie oddziaływania układów przekształtnikowych na sieć zasilającą, co może mieć wpływ na jakość energii w punktach zasilania. Odzwierciedlone jest to w wymaganym sposobie pomiaru zaburzeń, przy użyciu sztucznej sieci stabilizującej impedancję (Line Impedance Stabilization Network - LISN). Sztuczna sieć ma za zadanie wytworzyć znormalizowaną impedancję pomiarową, w całym zakresie częstotliwości dla zakłóceń przewodzonych (9 kHz - 30 MHz). Rozległość systemów zawierających przekształtniki energoelektroniczne powoduje jednak, że pomimo spełnienia wymogów norm dotyczących oddziaływania na sieć zasilającą (kompatybilność zewnętrzna), w różnych częściach systemu mogą być wytwarzane zaburzenia, stanowiące zagrożenie dla poprawnej pracy całości systemu (kompatybilność wewnętrzna).

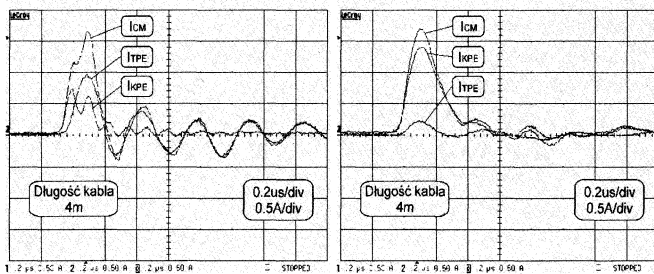
W trójfazowych, przekształtnikowych układach energoelektronicznych, z szybkimi tranzystorami IGBT, źródłem prądów zakłóceń wspólnych jest napięcie zakłóceń wspólnych, które pojawia się w punkcie neutralnym systemu. Wynika ono z chwilowej asymetrii napięć fazowych przy przełączaniu łączników. W przypadku modulacji szerokości impulsów (PWM), napięcie zakłóceń wspólnych ma kształt funkcji schodkowej, o skoku $1/3 U_{DC}$ i amplitudzie U_{DC} (gdzie U_{DC} jest napięciem obwodu pośredniczącego prądu stałego). Szybkie narosty napięcia zakłóceń wspólnych (du/dt może osiągać wartości kilkunastu kV/ μ s) wzbudzają prądy zakłóceń wspólnych w pojemnościach pasożytniczych układu obciążenia przekształtników. Istotnym problemem przy rozwiązywaniu zagadnień związanych z kompatybilnością elektromagnetyczną rozległych systemów, są trudności przy tworzeniu uogólnień. Widmo emitowanych zakłóceń zale-

¹ Bardziej ugruntowany termin „zakłócenia” jest w niniejszej pracy używany w znaczeniu „zaburzenia”, jeśli kontekst zastosowania nie budzi wątpliwości.

zy, bowiem, nie tylko od charakterystyki ich źródła, ale również od konfiguracji systemu: długości, sposobu uziemienia i ekranowania kabli, impedancji w.cz instalacji uziemiającej itp. Każdy element systemu (np. kable, dławiki, transformatory dodawcze, urządzenia zasilane), poprzez swoje parametry pasożytnicze, może wносить wkład do ogólnego rozptyłu prądów zakłóceń. W przypadku długich kabli oraz uzwojeń maszyn elektrycznych, często istnieje potrzeba rozpatrywania zjawisk falowych, wynikających z wielokrotnych odbić fal wędrownych.

Złożoność problemów mogących występować podczas analizy rozprzestrzeniania się zakłóceń zobrazowano na rysunku 1. Są to przebiegi prądów CM w układzie z transformatorem zasilanym napięciem o modulowanej szerokości impulsu (PWM), powszechnie stosowanym jako transformator dodawczy w układach kondycjonowania energii. Pomiar wykonano dla dwóch sposobów uziemienia ekranów kabla zasilającego: transformator uziemiony jedynie po stronie falownika i uziemiony po obu stronach.

Gdy ekran kabla uziemiony jest tylko z jednej strony, na całkowity prąd zakłóceń wspólnych I_{CM} składają się: prąd I_{KPE} formowany na rozłożonych pojemnościach pasożytniczych i indukcyjnościach kabla oraz prąd I_{TPE} przepływający przez uziemienie rdzenia transformatora, a wynikający głównie z jego pasożytniczych pojemności doziemnych. Uziemienie drugiej strony ekranu kabla stwarza alternatywną drogę dla przepływu prądu CM transformatora, co powoduje zmniejszenie prądu płynącego przez przewód uziemienia transformatora oraz niewielkie zwiększenie całkowitego prądu zakłóceń wspólnych.



Rys.1. Rozptyw prądów zakłóceń wspólnych w zależności od sposobu uziemienia kabla: jedynie na falowniku oraz po obu stronach

Zależność rozptyłu prądów zakłóceń od konfiguracji systemu powoduje, że w układach energoelektrycznych duże znaczenie mogą mieć badania w miejscu zainstalowania urządzeń (badania *in situ*). Analizy EMC prowadzone w warunkach znormalizowanych, powinny jednak umożliwiać określenie rozptyłu zakłóceń w miejscu przyszłego zainstalowania.

Przyjęta w Instytucie Inżynierii Elektrycznej strategia rozwiązywania problemów EMC w układach zawierających przekształtniki energoelektryczne polega na jednoczesnych pomiarach i analizach rozprzestrzeniania się zakłóceń w dziedzinie częstotliwości i czasu. Analizy te umożliwiają lokalizację i określenie charakteru źródła zakłóceń oraz identyfikację dróg przepływu prądów zakłóceń. Ułatwiają tym samym wybór właściwych metod zapewniania kompatybilności wewnętrznej i zewnętrznej układu.

Systemami, w których ze szczególną wyrazistością występują problemy związane z kompatybilnością elektromagnetyczną są układy napędowe zasilane z przekształtników z

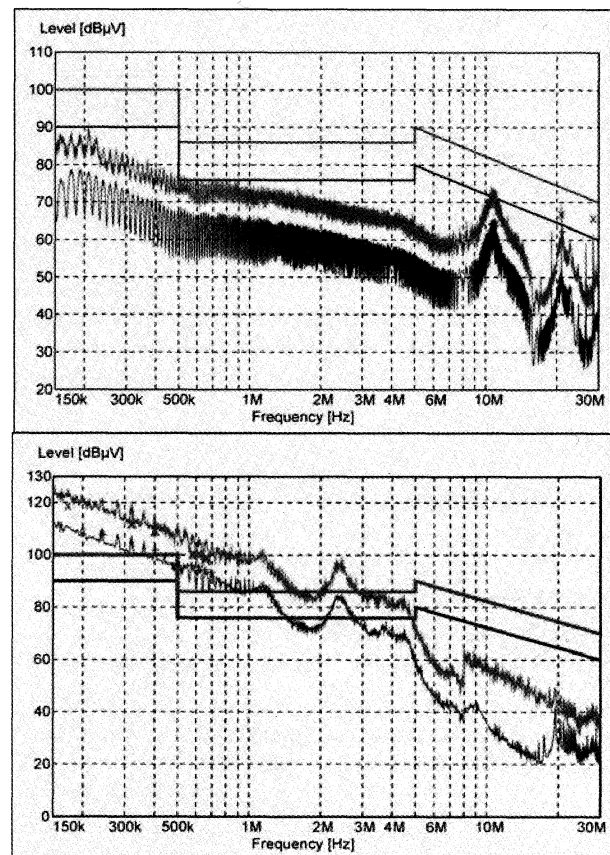
modulacją PWM. W literaturze podaje się kilka efektów, które wynikają z braku, szeroko pojmowanej, kompatybilności wewnętrznej, które nie występują przy zasilaniu z trójfazowej sieci sinusoidalnej [1]. Są to:

- zwiększenie poziomu emisji zakłóceń
- niepożądane zadziałania wyłączników różnicowo-prądowych
- przepięcia w układach z długimi kablami zasilającymi
- prądy łożyskowe w łożyskach silników

3. Pomiary w dziedzinie częstotliwości

Na rys. 2. przedstawiono widma częstotliwościowe zakłóceń dwóch systemów napędowych zmierzone zgodnie z normą PN EN 61800-3 dla układów napędowych o regulowanej prędkości (w zakresie 150 kHz - 30 MHz), przy użyciu LISN oraz pomiarowego odbiornika zakłóceń Rohde&Schwarz.

Pierwszy z systemów, który zawiera przekształtnik z prostownikiem niesterowanym, wytwarza zakłócenia, których poziom mieści się w limitach określonych normą. Zakłócenia wytwarzane w drugim systemie, zawierającym przekształtnik 4-kwadrantowy, wprowadzają do sieci zaburzenia, które znacznie przekraczają limity zakłóceń dopuszczalnych.

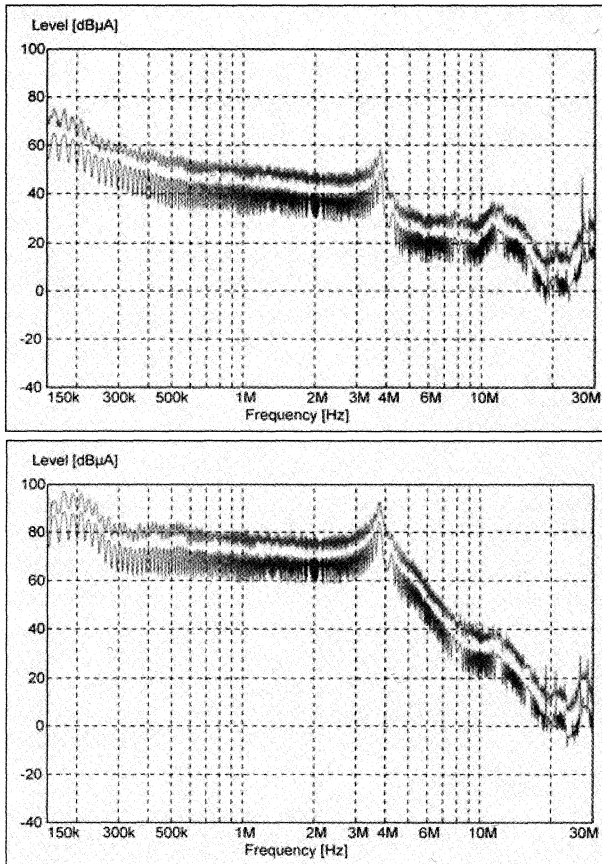


Rys.2. Spektrum zakłóceń przewodzonych wg PN EN 61800-3 napędów z przemiennikami częstotliwości: z mostkiem diodowym oraz 4-kwadrantowego

Jak wynika z rys. 3, pomimo spełnienia wymagań w zakresie oddziaływania na sieć zasilającą, poziom zakłóceń w systemie z prostownikiem niesterowanym, zmierzony po stronie silnikowej jest dużo wyższy (do 40 dB) niż po stronie sieci zasilającej. W celu uzyskania możliwości bezpośrednie-

go porównania poziomów zakłóceń, pomiar wykonano za pomocą sondy prądowej i pomiarowego odbiornika zakłóceń (pomiar przy pomocy LISN nie jest możliwy po stronie silnikowej).

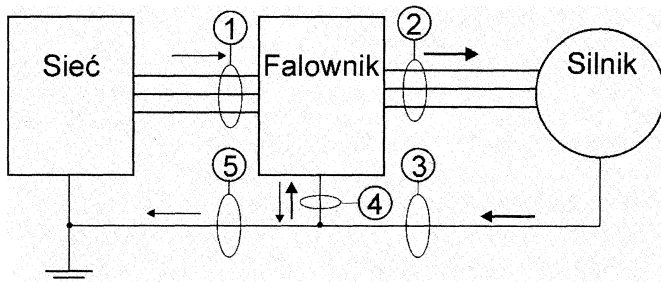
Kształt widma zakłóceń po stronie silnikowej przekształtnika pozwala na identyfikację dwóch oscylacyjnych przebiegów tłumionych o częstotliwościach około 190 kHz oraz 3,8 MHz.



Rys.3. Widmo prądów zakłóceń wspólnych: po stronie sieci oraz po stronie silnika

4. Pomiary w dziedzinie czasu

Analiza w dziedzinie czasu pozwala na jednoczesny pomiar prądów zakłóceń w kilku przewodach, z możliwością porównania faz początkowych przebiegów. Na rys. 4, pokazano schemat układu napędowego z przemiennikiem częstotliwości PWM wraz z zaznaczonymi miejscami pomiaru prądów zakłóceń wspólnych.



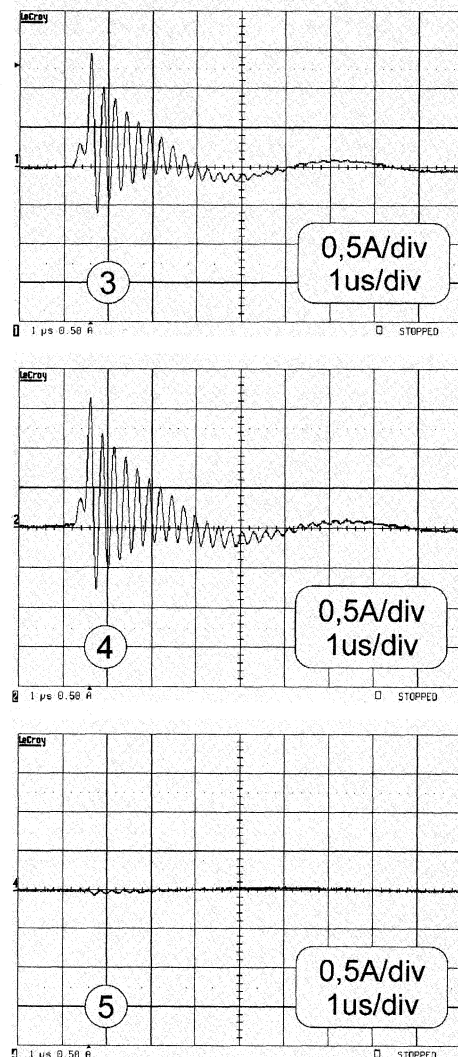
Rys.4. Schemat układu pomiarowego

Pomiary rozptyłu prądów wykonano za pomocą cyfrowego oscyloskopu wielokanałowego LeCroy, z sondami prądowymi o liniowym zakresie pomiarowym od DC do 50 MHz. Pomiary w dziedzinie częstotliwości sugerowały, że większa część prądu zakłóceń wspólnych, powstającego po stronie silnikowej układu, nie płynie w instalacji uziemiającej sieci, zamykając się po stronie silnikowej. W celu określenia rozptyłu prądu zakłóceń wspólnych w instalacji uziemienia, stworzono węzeł pomiarowy pozwalający na dodatkowy pomiar prądu w przewodzie uziemienia falownika. Wyniki pomiarów pokazano na rys. 5.

Wynika z nich, że droga powrotna prądu zakłóceń wspólnych, wytwarzanych po stronie silnika, do ich źródła w falowniku musi prowadzić przez pojemność pomiędzy uziemioną obudową (radiatorem) a obwodem pośredniczącym prądu stałego. W zmierzonych przebiegach można zidentyfikować obie częstotliwości oscylacji obserwowane w widmie zakłóceń.

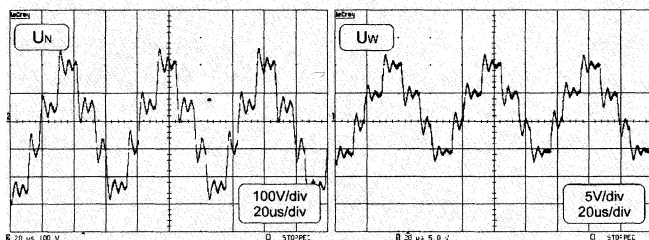
W podobny sposób, w układzie 4-kwadrantowym, można zidentyfikować dwa źródła zakłóceń – jedno po stronie silnikowej, a drugie po stronie sieci.

Obecność tak dużych zaburzeń po stronie silnika może powodować zakłócenia w pracy odbiorników wrażliwych, znajdujących się w bezpośrednim sąsiedztwie.



Rys.5. Rozptył prądów zakłóceń wspólnych w pomiarowym węźle uziemień

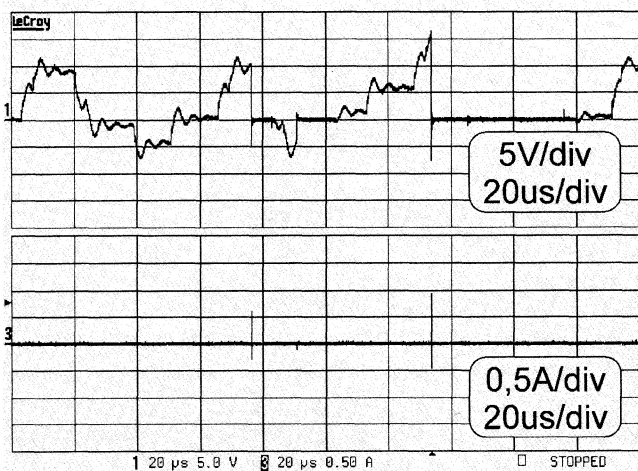
Innym efektem, związanym z istnieniem źródła napięcia zakłóceń wspólnych w falowniku, jest występowanie wyładowczych prądów w łożyskach silnika. Powodem tych wyładowań jest napięcie na wale, pojawiające się wskutek sprzężeń pojemnościowych wewnątrz silnika, przy skokowych zmianach napięcia zakłóceń wspólnych. Warunkiem wystąpienia napięcia na wale jest zaistnienie cienkiego filmu olejowego w łożyskach pracującego silnika. Napięcie na wale odwzorowuje kształt napięcia zakłóceń wspólnych wg proporcji wynikającej z dzielnika utworzonego przez pojemności pasozytne wewnątrz silnika (Rys.6.).



Rys.6. Napięcie zakłóceń wspólnych oraz napięcie na wale

Jeżeli napięcie na wale przekroczy wartość progową napięcia przebicia izolacyjnej warstwy olejowej, następuje wyładowanie w formie iskry elektrycznej. Duża częstość występowania takich wyładowań może prowadzić do stopniowej erozji powierzchni łożysk w trakcie eksploatacji silnika. Na rys. 7. przedstawiono moment w którym nastąpiło przebicie dielektrycznej warstwy olejowej w łożysku.

Jak wykazały badania prowadzone w Instytucie Inżynierii Elektrycznej, prąd wyładowania w łożysku zamyka się całkowicie wewnątrz silnika poprzez pojemności pasozytne [2,3]. Oznacza to, że nie płyną one w instalacji uziemienia i do ich detekcji należy stosować specjalne metody pomiarowe. Częstość występowania prądów łożyskowych oraz ich amplituda zależą głównie od poziomu napięcia na wale na który wpływ ma m.in. impedancja toru prądu zakłóceń wspólnych. Determinuje to, w pewnym stopniu, możliwości wyboru aktywnych i pasywnych metod zapewnienia kompatybilności elektromagnetycznej układu.



Rys.7. Napięcie na wale oraz prąd łożyskowy

5. Modele symulacyjne

Badania eksperymentalne w warunkach znormalizowanych pozwalają na budowę modeli symulacyjnych, które służą przede wszystkim do weryfikacji przyjętych założeń co do wielkości i rozptyłu prądów zakłóceń oraz wpływu na nie zmian w konfiguracji systemów. W praktyce, dla zakłóceń wspólnych wystarcza uproszczony model jednofazowy [4]. Wartości niektórych parametrów modelu trzeba oszacować, jednak duża ilość „więzów” pomiarowych, wynikających z jednoczesnego pomiaru kilku przebiegów prądów i napięć w układzie, nie pozwala tu na zbytnią dowolność. Uzyskiwane modele wystarczająco dokładnie - dla dalszych analiz - odwzorowują przebieg zjawisk w systemie [5].

6. Podsumowanie

Zapewnienie kompatybilności zewnętrznej w zakresie zakłóceń przewodzonych oznacza głównie spełnienie wymagań norm w zakresie oddziaływania na sieć zasilającą. Jednakże ze względu na rozległość układów zawierających przekształtniki energoelektroniczne oraz znaczną moc generowanych przez nie zakłóceń, należy wziąć pod uwagę wzajemne oddziaływanie poszczególnych elementów systemu (kompatybilność wewnętrzna systemu). Kluczowymi problemami w analizie EMC są lokalizacja źródeł zakłóceń i dróg ich rozprzestrzeniania się w systemie. Środkiem osiągnięcia tego celu może, być postulowana w pracy, jednoczesna analiza zjawisk w dziedzinie częstotliwości oraz w dziedzinie czasu. Znajomość dróg rozprzestrzeniania się zakłóceń poparta badaniami na modelach symulacyjnych może być podstawą wyboru właściwych metod zapewnienia kompatybilności elektromagnetycznej systemów.

Podziękowanie

Badania zrealizowane zostały w ramach grantu KBN nr 8T10A 034 21

Literatura

- [1]. A. von Jouanne, H. Zhang, A. K. Wallace, "An Evaluation Techniques for Bearing Currents, EMI and Overvoltages in ASD Applications", IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 34, No. 2, September/October 1997 pp.1113-1121.
- [2]. A. Kempski, "Capacitively coupled discharging currents in bearings of induction motor fed from PWM inverters", Elstat'2001, Special issue of Journal of Electrostatics.
- [3]. A. Kempski, R. Strzelecki, R. Smolenski, Z. Fedyczak, "Bearing current path and pulse rate in PWM-inverter-fed induction motor," IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference – PESC, Conference Proceeding, Vancouver, Canada, 2001 Vol. 4, pp. 2025–2030.
- [4]. S. Ogasawara, H. Akagi, "Modeling and Damping of High-Frequency Leakage Currents in PWM Inverter-Fed AC Motor Drive System," IEEE Industry Appl. Magazine, September/October, 1996 pp.1105-1113.
- [5]. A. Kempski, R. Strzelecki, R. Smolenski, "Common Mode Current Paths and Their Modelling in PWM Inverter Fed Drives," IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference – PESC, Conference Proceedings. Cairns, Australia.

Artykuł recenzowany.