

Warunki kompensacji napięcia zaburzeń wspólnych w falownikach napięcia przy modulacji sinusoidalnej PWM z dodatkiem przebiegów o częstotliwości trzeciej harmonicznej

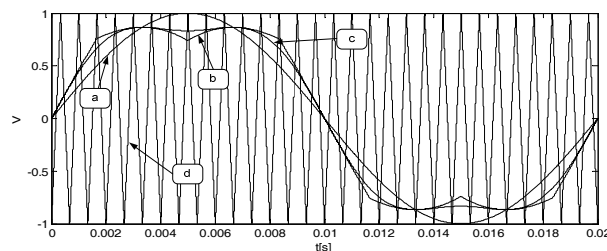
Streszczenie: W artykule przeanalizowano wpływ wybranych technik modulacji PWM na pracę filtrów zaburzeń w układach z falownikami napięcia. Przeprowadzone badania eksperymentalne wykazały, że stosowanie technik modulacji z dodatkiem funkcji o częstotliwości trzeciej harmonicznej może prowadzić do problemów z kompensacją zaburzeń wspólnych przy pomocy pasywnych i aktywnych filtrów zaburzeń. W artykule zaproponowano własną modyfikację w aktywnym filtrze zaburzeń w celu optymalizacji jego parametrów.

Abstract. In the article has been analyzed influence selected PWM techniques to EMI filters work in system with voltage source inverters. Experimental research have shown that the use of modulation techniques functions with the addition third harmonic frequency lead to problems of common mode voltage compensation by passive and active EMI filters. In the article has been proposed modifications in active EMI filter in order to optimize its parameters.

Słowa kluczowe: Techniki PWM, Falownik Napięcia, Filtry zaburzeń
Keywords: PWM techniques , Voltage Source inverters, EMI Filters

Wstęp

Falowniki napięcia znalazły szerokie zastosowanie w układach napędowych, gdzie pozwalają regulować prędkość obrotową silników prądu przemiennego. Zastosowanie w tych układach technik modulacji szerokości impulsów PWM (ang. Pulse With Modulation) wpływa na poprawę właściwości dynamicznych napędu i eliminację niższych harmonicznych z prądu obciążenia [1].



Rys. 1. Przebiegi przy modulacjach PWM : a)klasyczna modulacja sinus-PWM, b) C-B SVPWM, c) THRI-PWM, d) piłokształtna funkcja modulowana.

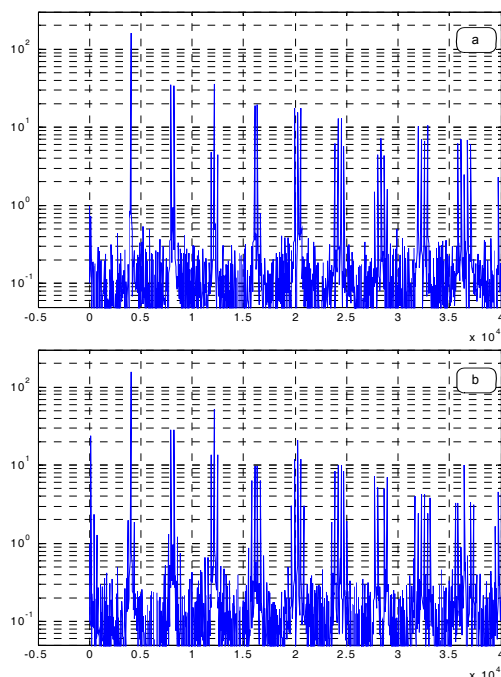
Klasyczna modulacja sinusoidalna PWM polega na porównywaniu modulującego przebiegu sinusoidalnego z piłokształtymi przebiegami modulowanymi [1]. W celu podwyższenia zakresu napięciowego falownika modyfikuje się funkcję modulującą wprowadzając dodatkowe składowe o częstotliwości trzeciej harmonicznej: składową sinusoidalną w modulacji THRI-PWM (ang. Third Harmonic Reference Injection PWM) lub składową trójkątną w modulacji C-B SVPWM (ang. Carrier Based Space Vector PWM) (rysunek 1).

Pomimo zniekształcenia przebiegów napięć fazowych przebiegiem o częstotliwości trzeciej harmonicznej nie wpływa się na moment powstający w silniku, ponieważ w napięciach międzyfazowych następuje eliminacja zniekształceń. Modulacje z dodatkem trzeciej harmonicznej zmieniają przebiegi czasowe i charakter widma napięcia zaburzeń wspólnych wpływając na właściwości i kompatybilność elektromagnetyczną całego układu, w którym występuje falownik.

Napięcie zaburzeń wspólnych w falowniku napięcia

Napięcie zaburzeń wspólnych V_{CM} (ang. Common Mode Voltage) powstaje w punkcie neutralnym systemu w wyniku chwilowej niesymetrii wyjściowych napięć falownika. Wartość tego napięcia w falowniku trójfazowym jest równa sumie wartości chwilowych wszystkich napięć fazowych, podzielonej przez ich ilość (1).

$$(1) \quad V_{CM} = (V_{F1} + V_{F2} + V_{F3}) / 3$$



Rys. 2. Widmo napięcia zaburzeń wspólnych przy modulacji a) sinus-PWM b) C-B SVPWM. (częstotliwość modulowana 4 kHz)

VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

Napięcie Zaburzeń Wspólnych w układach napędowych jest źródłem szeregu niepożądanych efektów takich jak :

- Napięcie na wale silnika[2,3].
- Prądy łożyskowe, które znacząco obniżają żywotność napędu[2,3].
- Podwyższone prądy upływu, mogące powodować błędne działanie zabezpieczeń upływnościowych [4].
- Prądy zaburzeń wspólnych, stanowiące jeden z podstawowych problemów kompatybilności elektromagnetycznej [5,8].

Wprowadzanie w procesie modulacji przebiegów o częstotliwości trzeciej harmonicznej jest w rzeczywistości wprowadzaniem dodatkowej składowej napięcia zaburzeń wspólnych. Przy modulacji THRI-PWM i C-B SVPWM w widmie napięcia zaburzeń wspólnych pojawia się zatem składowa niskiej częstotliwości(rysunek.2).

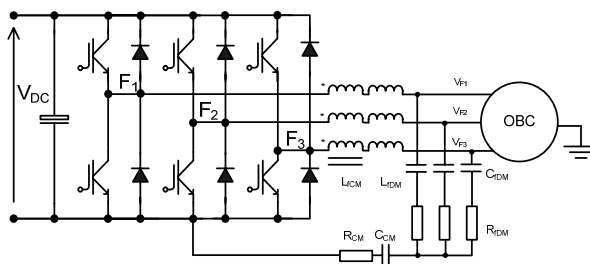
Obecność w widmie komponentów o niskiej częstotliwości może powodować znaczną zmianę warunków pracy elementów indukcyjnych filtrów zaburzeń wspólnych, stwarzając niebezpieczeństwo ich nasycenia.

Kompensacja Napięcia Zaburzeń Wspólnych

Na rysunku 3 przedstawiono schemat układu napędowego z pasywnym filtrem zaburzeń natomiast na rysunku 4 przedstawiono układ napędowy z filtrem aktywnym, które zostały zaproponowane przez Akagiego [6][7]. Filtry te projektowane są w celu tłumienia prądów zaburzeń wspólnych o wysokiej częstotliwości (rzędu MHz), pozwalają one również na uzyskanie sinusoidalnych napięć wyjściowych. Elementem warunkującym poprawną pracę tych filtrów jest poprawne dobranie rdzeni elementów indukcyjnych tak aby nie ulegały one nasyceniu. W prawidłowo działającym filtrze praktycznie całe napięcie zaburzeń wspólnych odkłada się na dławiku lub transformatorze zaburzeń, stąd indukcję takich elementów można obliczać z prawa Faradaya (2).

$$(2) \quad B = \frac{\phi}{S} = \frac{1}{SN} \int V_{CM}(t) dt$$

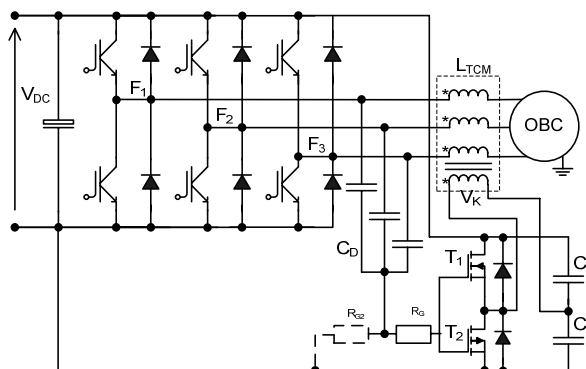
gdzie: s - średnica rdzenia N - ilość zwojów V_{CML} - napięcie na elemencie indukcyjnym



Rys. 3. Układ napędowy z pasywnym filtrem zaburzeń Pasywnym filtr zaburzeń

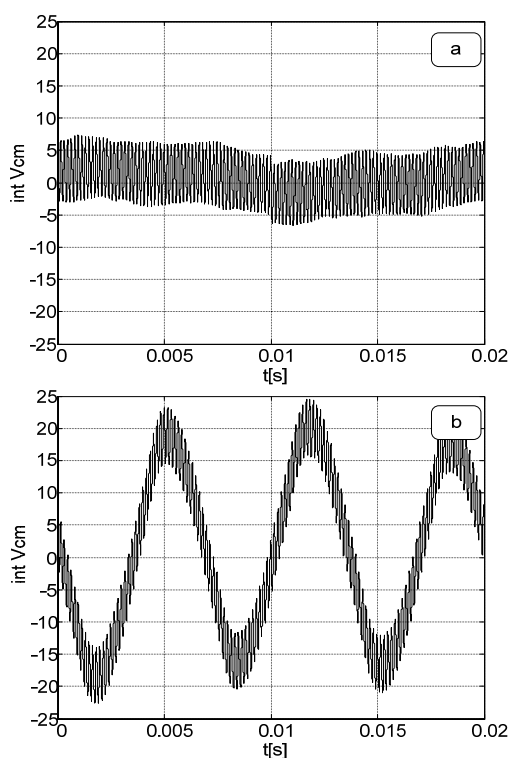
Na rysunku 5 przedstawiono całkę z napięcia zaburzeń wspólnych wyliczoną na podstawie pomiarów wykonanych w układzie eksperymentalnym (dla częstotliwości

łączeń 4kHz). W przedstawionym przypadku wartość maksymalna całki z przebiegu napięcia VCM jest kilkakrotnie wyższa przy modulacji C-B SVPWM niż przy klasycznej modulacji sinusoidalnej PWM.



Rys. 4. Filtry zaburzeń wspólnych a) pasywny b) aktywny.

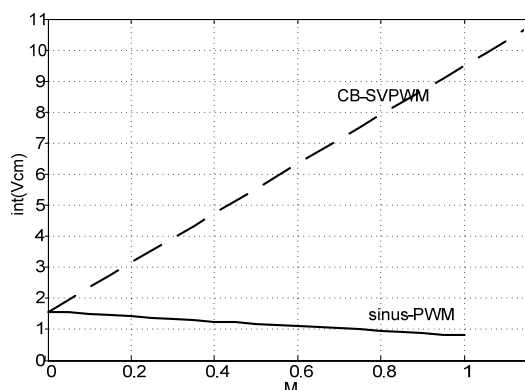
Na rysunku 6 przedstawiono wyznaczone na podstawie symulacji charakterystyki, zależności całki z napięcia zaburzeń wspólnych od współczynnika głębokości modulacji M (częstotliwość modulowana 4kHz).



Rys. 5. Całka z napięcia zaburzeń wspólnych przy modulacji: a) C-B SVPWM , b) sinus PWM

VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

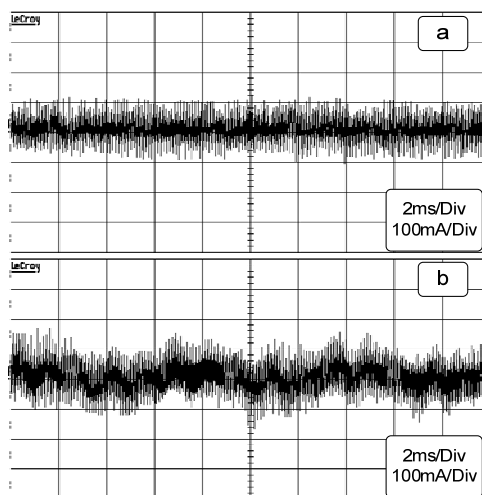
Przy modulacji sinusoidalnej PWM wartość maksymalna całki z napięcia zaburzeń wspólnych, jest uzyskiwana przy zerowym współczynniku głębokości modulacji i maleje wraz z jego wzrostem. Przy modulacji CB-SVPWM wartość całki napięcia zaburzeń wspólnych rośnie wraz ze współczynnikiem wzmocnienia M i może być wielokrotnie większa niż przy modulacji sinusoidalnej PWM. Przy stosowaniu modulacji z dodatkowymi składowymi o częstotliwości trzeciej harmonicznej, niebezpieczeństwo nasycenia rdzeni filtrów zaburzeń jest zatem wyższe niż przy klasycznej modulacji sinusoidalnej.



Rys. 6. Wartość maksymalna całki napięcia zaburzeń wspólnych przy modulacjach C-B SVPWM i sinus PWM.

Filtr Pasywny

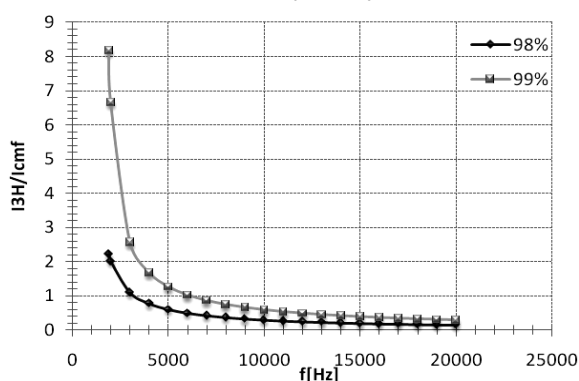
Parametry wykorzystanego układu filtru pasywnego umieszczone zostały w tabeli 1. Na rysunku 7 przedstawiono przebiegi prądów magnesujących w układzie pasywnym, który skutecznie tłumi wysokoczęstotliwościową część widma.



Rys. 7. Prąd magnesujący dławik zaburzeń wspólnych I_m przy modulacji: a) sinus PWM b) SVPWM.

Chociaż filtr pasywny jest filtrem dolnoprzepustowym to, przy modulacji C-B SVPWM, w prądzie magnesującym może pojawić się trzecia harmoniczna, która powoduje, że w przedstawionym przypadku prąd magnesujący osiąga o połowę wyższą wartość maksymalną niż przy klasycznej modulacji sinusoidalnej. To o ile wartość prądu magnesującego jest większa przy modulacji CB-SVPWM niż przy klasycznej modulacji sinusoidalnej PWM jest zależne od częstotliwości nośnej i parametrów filtra.

Na rysunku 8 przedstawiono charakterystykę stosunku prądów magnesujących trzeciej harmonicznej do prądów o częstotliwości modulowanej w zależności od tej częstotliwości. Charakterystyki obliczono dla optymalnie dobranych parametrów filtra tak aby stłumione zostało 99% lub 98% amplitudy napięcia zaburzeń wspólnych (zgodnie z [6]). Na podstawie niniejszej charakterystyki można stwierdzić, że największe trudności przy kompensowaniu napięcia zaburzeń wspólnych występują dla niższych częstotliwości modulowanych, co wynika z bliskości częstotliwości zaburzeń i trzeciej harmonicznej. Rozwiązaniem może być podniesienie częstotliwości granicznej filtra i w konsekwencji obniżenie tłumienności dla niższych częstotliwości.



Rys 8. Stosunek prądów magnesujących trzeciej harmonicznej do prądu o częstotliwości modulowanej przy tłumieniu 99% i 98% amplitudy napięcia zaburzeń wspólnych.

Tabela.1 . Parametry pasywnego filtra zaburzeń

Nazwa parametru	Wartość
L_{TDM}	0.5mF
L_{FCM}	28mF
C_{TDM}	10uF
C_{FCM}	470nF
R_{TDM}	1 Ω
R_{FCM}	15 Ω

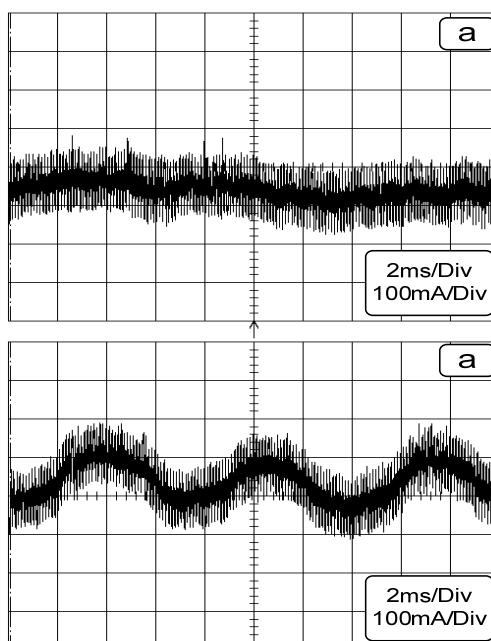
Filtr Aktywny

Działanie filtra aktywnego polega na dodaniu napięcia kompensującego V_K będącego w przeciw-fazie do napięcia zaburzeń wspólnych V_{CM} przy pomocy wysokoczęstotliwościowego transformatora zaburzeń. Do wytworzenia napięcia V_K służy wtórnik napięcia oraz układ detekcji złożony z kondensatorów C_D (rysunek 4). Wtórnik przenosi praktycznie całe napięcie zaburzeń wspólnych w związku z czym niebezpieczeństwo nasycenia się rdzenia z powodu obecności w tym napięciu niskiej częstotliwości jest dużo wyższe niż w układzie filtra pasywnego. Na rysunku 8 przedstawiono prąd magnesujący dławik przy modulacji sinus PWM i CB-SVPWM. Przebiegi uzyskano w układzie eksperymentalnym dla parametrów układu podanych w tabeli 2. W przedstawionym przypadku prąd magnesujący transformator przy modulacji

VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

CB-SVPWM jest prawie dwukrotnie większy niż przy klasycznej modulacji sinusoidalnej PWM.

Rozwiązaniem problemu może być wykonanie układu detekcji, w taki sposób aby niskoczęstotliwościowa składowa zaburzeń wspólnych nie była przenoszona przez wtórnik. Proponuje się wstawienie dodatkowego rezystora R_{B2} oznaczonego linią kreskowaną na rysunku 4. Rezystor wraz z pojemnościowym układem detekcji stanowi filtr górnoprzepustowy, którego zadaniem jest tłumienie dolnej części widma. Wartość rezystora została wybrana doświadczalnie tak by układ pracował w sposób zbliżony do omówionego filtra pasywnego.



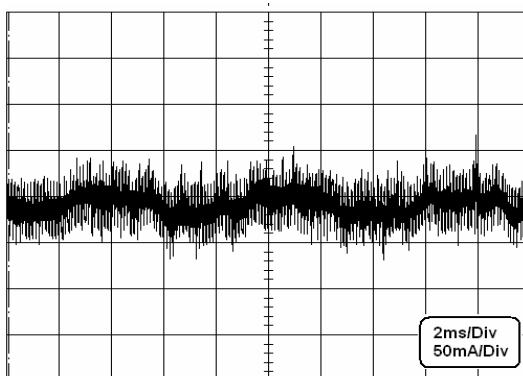
Rys. 9. Prąd magnesujący transformator zaburzeń wspólnych przy modulacji : a) sinus PWM b) CB-SVPWM

Tabela. 2. Parametry aktywnego filtra zaburzeń.

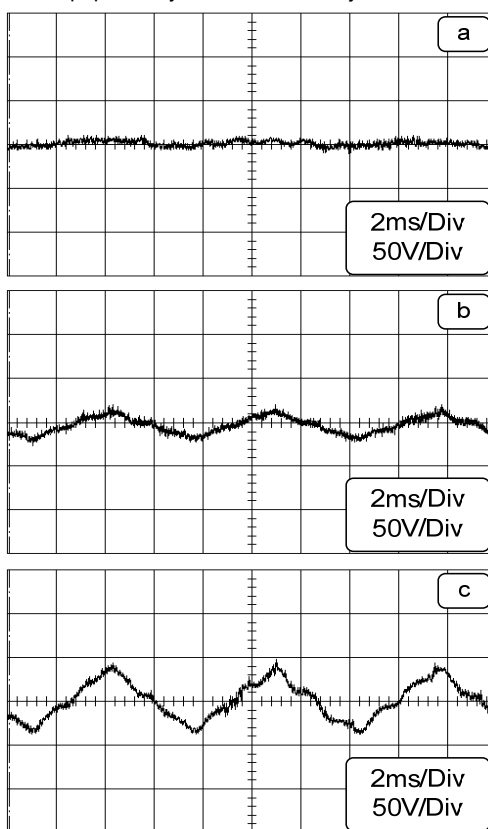
Nazwa parametru	Wartość
T1	IRFP450LCP
T2	IXTH11P50
CD	1 μ F
C1,C2	940 μ F
RG	80 Ω
RG2	100k Ω
LTCM	28mH

Na rysunku 9 przedstawiono przebieg prądu magnesującego transformator zaburzeń wspólnych przy modulacji CB-SVPWM w układzie z dodatkowym rezystorem. Dzięki

kształtowaniu widma napięcia zaburzeń wspólnych w układzie detekcji uzyskuje się w konsekwencji ograniczenie prądów magnesujących transformator.



Rys.10. Prąd magnesujący transformator zaburzeń wspólnych przy modulacji CB-SVPWM i poprawionym układzie detekcji filtra



Rys.11. Napięcie zaburzeń wspólnych za aktywnym filtrem zaburzeń a) przy modulacji sinusoidalnej PWM, b) przy modulacji CB-SVPWM układ podstawowy c) przy modulacji CB-SVPWM układ zmodyfikowany.

VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

Przy modulacji sinus PWM napięcie zaburzeń wspólnych zostaje praktycznie w całości skompensowane za pomocą filtra (rysunek 11/a). Przy modulacji CB-SVPWM filtr nie tłumi napięcia zaburzeń wspólnych o niskiej częstotliwości, co zostało pokazane na rysunku 11 b,c.

Podsumowanie

W pracy omówiono warunki kompensacji napięcia zaburzeń wspólnych w trójfazowych falownikach napięcia przy wykorzystaniu technik modulacji z dodatkowymi przebiegami o częstotliwości trzeciej harmonicznej.

Przeprowadzone rozważania teoretyczne zostały potwierdzone badaniami przeprowadzonymi w układzie eksperymentalnym.

Na podstawie badań zauważono, że stosowanie technik modulacji podwyższających zakres napięcia wyjściowego falownika, prowadzi do powstania niskoczęstotliwościowej składowej napięcia zaburzeń wspólnych, która w znaczącym stopniu utrudnia kompensację zaburzeń wspólnych przy pomocy pasywnych i aktywnych filtrów. W filtrach tych dochodzi do zwiększenia prądów magnesujących rdzenie elementów indukcyjnych, przez co najczęściej konieczne jest zwiększenie ich rozmiarów. Filtr pasywny narażony jest na niebezpieczeństwo nasycania rdzenia, głównie w zakresie niskich częstotliwości modulowanych. W aktywnym filtrze zaburzeń przy modulacji z dodatkowymi przebiegami o częstotliwości trzeciej harmonicznej prąd magnesujący transformator jest podwyższony w szerokim paśmie częstotliwości modulowanej. W filtrze tym zaproponowano prosty sposób kształtowania sygnału kompensujący tak by prąd płynący przez transformator był możliwie niski.

Rozważenie opisywanego zjawiska w procesie projektowania filtra pozwala zatem na obniżenie jego kosztu i rozmiarów.

Literatura

- [1] Holmes G. D., Lipo T. A.: „Pulse width modulation for power converters. Principles and practice”. IEEE Press, 2003.
- [2] Chen S., Lipo T.: „Bearing currents and shaft voltages of an induction motor” under hard- and soft-switching inverter excitation. IEEE Trans. on Industry Applications, 1998, Vol. 34
- [3] Loh P. C., Holmes D. G., Fukuta T., Lipo T.: „A Reduced Common Mode Hysteresis Current Regulation Strategy for Multilevel Inverters” IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 19, No. 1, January 2004
- [4] Grandi G., Casadei D., Reggiani U., „Analysis of common- and differentialmode HF current components in PWM inverter-fed AC motors”. Proc. 29th IEEE Power Electronics Specialist Conference PESC'98,
- [5] Clayton R. P.: „Introduction to Electromagnetic Compatibility” Second Edition Wiley - Interscience 2006
- [6] 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”. Proc. 33rd IEEE Power Electronics Specialist Conference, PESC02,
- [7] Akagi H., Ogasawara S., Ayano H.: „An active circuit for cancellation of common-mode voltage generated by PWM inverter”. IEEE Trans. on Power Electronics, 2000, Vol. 13, No. 5, pp.835-841.
- [8] Kempski A.: „Elektromagnetyczne zaburzenia przewodzone w układach napędów przekształtnikowych” Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego 2005

Autor: mgr inż. Piotr Leżyński, słuchacz studiów doktoranckich na Uniwersytecie Zielonogórskim w Instytucie Inżynierii Elektrycznej,
Pracownik Instytutu Elektrotechniki oddział METROL Zielona Góra
Email: piotrlezynskii@tlen.pl

