

Adam Kempski, Robert Smoleński  
Uniwersytet Zielonogórski, Zielona Góra

## PRĄDY ŁOŻYSKOWE W UKŁADACH NAPĘDOWYCH Z FALOWNIKAMI PWM

### BEARING CURRENTS IN PWM INVERTER-FED DRIVES

**Abstract:** The application of high switching techniques improves the economic and technical parameters of induction motor drives. However, it has been discovered recently an adverse effect on a bearing assembly which is caused by destructive bearing currents EDM (Electrical Discharge Machining). Since the introduction of the IGBT technology there has been a documented increase in electrically induced bearing failures and shortening electrical life of bearings. In the paper it has been presented the statistical approach related to the distributions of EDM currents in drives with different filter configurations.

Commonly used solutions for CM currents reducing are the line reactors and CM chokes. However, they increase risk of the appearance of EDM currents of higher amplitudes in shorter awaiting times. The CM transformer is a good choice for a simultaneous decreasing of the CM current and the risk of EDM currents.

However, the best method of an elimination of bearing currents is a cancellation of its source – common mode voltage - at the output of the inverter. In a paper it has been presented so-called sinusoidal filter that assures nearly zero common voltage at the filter output, strongly damps common and differential EMI and eliminate bearing currents.

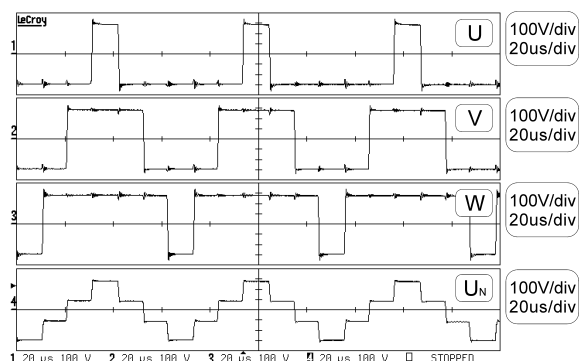
#### 1. Wstęp

Problem prądów łożyskowych w układach napędowych nie jest zagadnieniem nowym. W przeszłości dotyczył on maszyn o dużych mocach, zasilanych trójfazowym, symetrycznym napięciem sinusoidalnym, a spowodowany był niesymetrią magnetyczną silnika. W ciągu ostatnich lat zanotowano znaczny wzrost liczby uszkodzeń łożysk silników związany z niesymetrią elektryczną napięć wyjściowych falowników napięcia PWM [1].

#### 2. Napięcie na wale i prądy łożyskowe w układach napędowych z falownikami PWM

Zasilanie falownikowe silnika poprzez niesymetrię elektryczną napięć wyjściowych falownika powoduje powstanie napięcia zaburzeń wspólnych w punktach neutralnych układu. Na Rys.1, przedstawiono przebiegi wyjściowych napięć fazowych falownika oraz napięcie zaburzeń wspólnych  $U_N$  (ang. common mode - CM voltage) definiowane jako jedna trzecia sumy chwilowych wartości napięć fazowych nazywane jest również napięciem niezrównoważenia. W przypadku modulacji sinusoidalnej PWM napięcie  $U_N$  ma kształt funkcji schodkowej, o amplitudzie równej połowie napięcia obwodu pośredniczącego prądu stałego falownika  $U_{DC}$  i skokach równych  $1/3 U_{DC}$ . Okres

zmian napięcia zaburzeń wspólnych równy jest okresowi funkcji modulującej falownika.

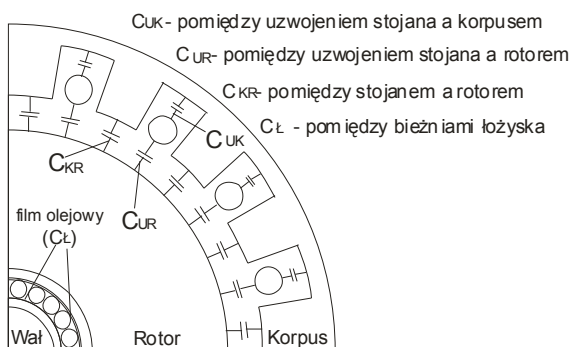


Rys.1. Powstawanie napięcia niezrównoważenia na wyjściu falownika (pomiar – modulacja sinusoidalna PWM)

Szybkie zmiany napięcia  $U_N$  mogą wzbudzać prądy w pasożytniczych pojemnościach doziemnych układu (prądy zaburzeń wspólnych) zarówno w kablach zasilających, jak i w samym silniku [2]. Na Rys.2, przedstawiono rozkład pojemności pasożytniczych w silniku indukcyjnym. Podczas pracy silnika, w obracających się łożyskach pomiędzy bieźniami a kulkami wytwarza się cienka, izolacyjna warstwa filmu olejowego. Przewodzące bieżnie i kulki oraz izolujący film olejowy tworzą układ opisany na rysunku pojemnością łożyska ( $C_L$ ). Pojemność

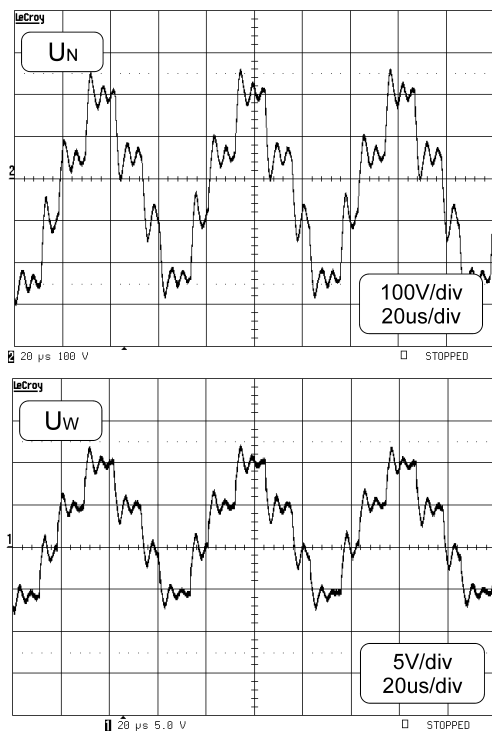
ta wraz z pozostałymi rozłożonymi pojemnościami pasozytniczymi tworzą dzielnik pojemnościowy wewnątrz silnika, umożliwiając ładowanie się wału.

Rozłożone (zastępcze) pojemności pasozytne



Rys.2. Schemat rozłożonych pojemności pasozytniczych w silniku indukcyjnym

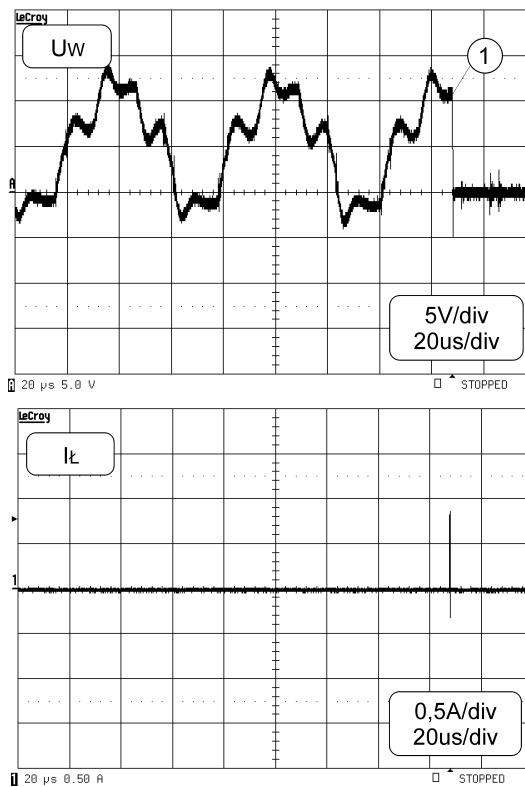
Przebieg napięcia na wale  $U_w$  odwzorowuje przebieg napięcia w punkcie neutralnym uzwojeń silnika  $U_N$ , Rys.3.



Rys.3. Napięcie niezrównoważenia oraz napięcie na wale

Napięcie to może okazać się wystarczającym do przebicia cienkiej warstwy filmu olejowego w łożysku. Następuje wyładowanie, które w literaturze określa się jako prąd EDM – Electric Discharge Machining. Udoskonalenie charakterystyk hydrodynamicznych łożysk w wyniku postępu technologicznego doprowa-

dziło do zmniejszenia grubości filmu olejowego i paradoksalnie, zwiększyło zagrożenie wystąpienia wyładowań typu EDM. Na Rys.4 przedstawiono przebieg napięcia na wale, które okazało się wystarczające do wywołania prądu łożyskowego EDM.



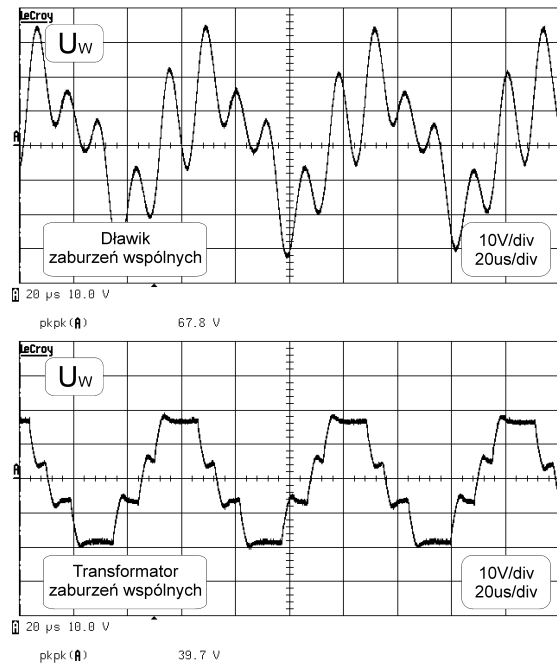
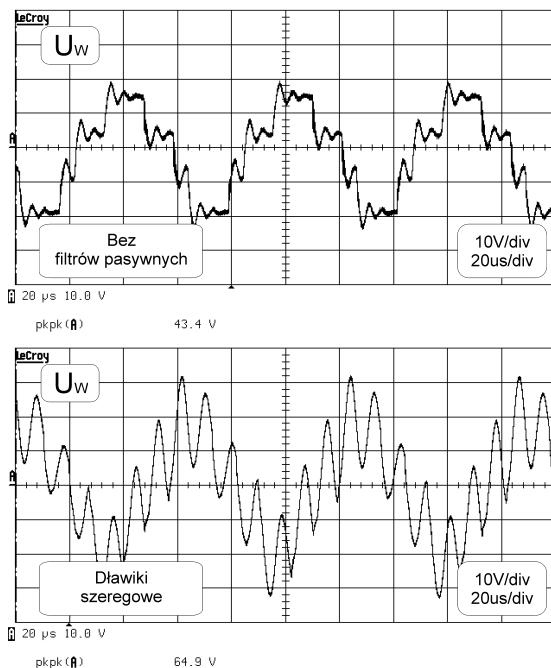
Rys.4. Przykładowy przebieg napięcia na wale i wyładowczego prądu łożyskowego

Punktowo rozładowująca się energia wyładowania może zapoczątkować elektroerozyjny proces zniszczenia bieżni łożyska. Zwiększa się prawdopodobieństwo, że następne wyładowania EDM będą występować w tym samym miejscu, doprowadza to do powstania charakterystycznego wzoru uszkodzeń na powierzchni bieżni (ang. flutting). Prądy łożyskowe mogą znacznie skrócić czas życia łożysk [1].

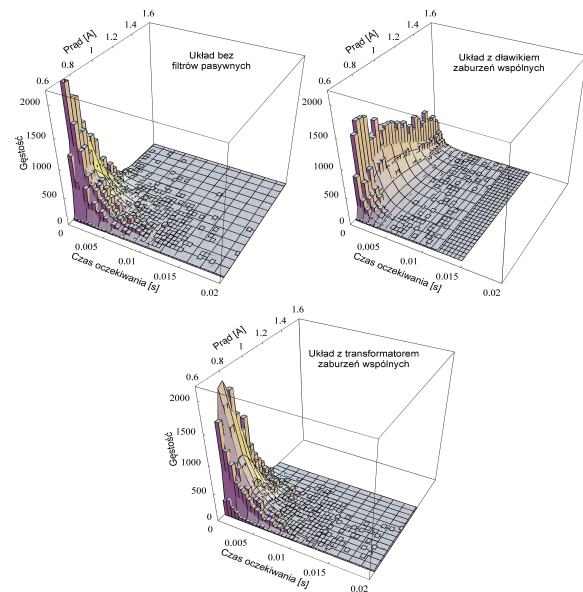
### 3. Wpływ filtrów indukcyjnych na amplitudy i częstość występowania prądów łożyskowych

Na amplitudę i częstość występowania prądów EDM ma wpływ wiele czynników zarówno natury elektrycznej związanej z przebiegami napięcia  $U_N$ , jak i warunkami konstrukcyjnymi i środowiskowymi. W określonej konfiguracji układu napędowego decydującą rolę będzie miał przebieg napięcia zaburzeń wspólnych a w szczególności jego amplituda.

Proste filtry indukcyjne stosowane do ograniczenia prądów zaburzeń mają za zadanie ograniczyć szybkość narastania  $du/dt$  napięcia CM. Przy stosowaniu takich filtrów nie zwraca się zazwyczaj uwagi na to, że mogą one poprzez zmianę impedancji toru prądów zaburzeń wspólnych zwiększyć amplitudę tego napięcia. Ma to jednak kapitalne znaczenie dla prawdopodobieństwa pojawienia się prądów łożyskowych, gdyż zwiększona amplituda napięcia CM przenosi się na wał zgodnie z proporcją wynikającą z dzielnika pojemnościowego. Efekt ten przedstawiono na Rys.5 dla różnych filtrujących elementów indukcyjnych: dławików szeregowych, dławików zaburzeń wspólnych i transformatora zaburzeń wspólnych [3,4]. Na Rys.6 przedstawiono złożenie histogramu i rozkładu teoretycznego częstości występowania i amplitud prądów EDM w układzie bez filtrów, z dławikiem CM i transformatorem CM [5]. Wynika z nich, że rzeczywiście w układzie z dławikiem CM, w którym występuje zwiększona amplituda napięcia na wale amplituda występujących prądów łożyskowych jest większa a czas oczekiwania na wyładowanie (czas pomiędzy kolejnymi wyładowaniami) ulega znacznemu skróceniu. W przypadku transformatora zaburzeń wspólnych energia prądów zaburzeń wspólnych ulega dyssypacji we wtórnym uzwojeniu transformatora, przez co uzyskuje się nieznaczną poprawę nawet w stosunku do układu bez filtrów zaburzeń wspólnych.



Rys.5. Oddziaływanie filtrów pasywnych na napięcie na wale



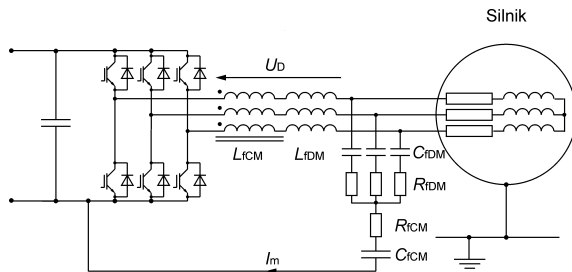
Rys.6. Rozkłady prądów łożyskowych w napędach: bez filtrów pasywnych, z dławikiem zaburzeń wspólnych i transformatorem zaburzeń wspólnych

#### 4. Eliminacja prądów łożyskowych w układzie z pasywnym kompensatorem napięcia zaburzeń wspólnych

Filtry pasywne umożliwiają również całkowitą eliminację prądów łożyskowych. Sposób ich eliminacji polega na usunięciu przyczyny powstawania prądów łożyskowych – napięcia niezrównoważenia. Jego kompensacja następuje poprzez wytworzenie, w torze zasilania pomię-

dzy falownikiem a silnikiem, napięcia dodawczego równego napięciu  $U_{CM}$  o przeciwnym zwrocie. Działanie tego filtra można identyfikować z kompensacją szeregową.

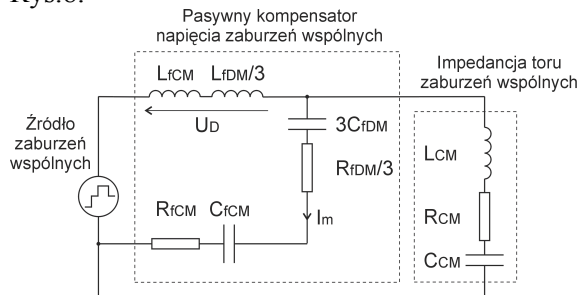
Na Rys.7 przedstawiono schemat pasywnego filtra napięcia zaburzeń wspólnych opisany przez H. Akagi [6].



Rys.7. Pasywny kompensator napięcia niezrównoważenia

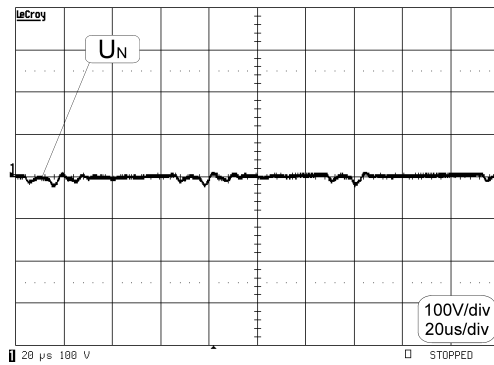
Ogranicza on zarówno zaburzenia różnicowe, jak i wspólne i składa się z kombinacji powszechnie znanych pasywnych filtrów zaburzeń wspólnych i różnicowych typu gamma. Gałąź szeregową stanowią filtry stanowią dławik zaburzeń wspólnych ( $L_{ICM}$ ) oraz dławiki zaburzeń różnicowych ( $L_{IDM}$ ). Niemal całkowita kompensacja napięcia zaburzeń wspólnych na zaciskach silnika, zapewniona jest dzięki uzyskaniu na gałęzi szeregowej spadku napięcia równego, w przybliżeniu, napięciu niezrównoważenia.

Jednofazowy model napędu dla zaburzeń wspólnych umożliwiający analizę działania kompensatora pasywnego przedstawiono na Rys.8.

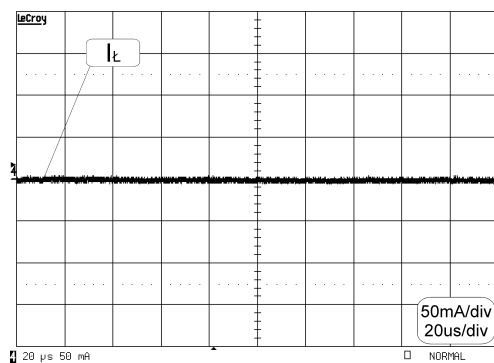
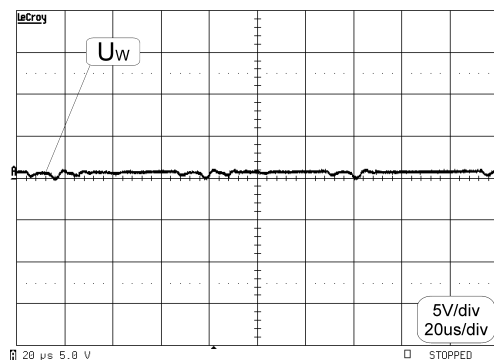


Rys.8. Jednofazowy model zastępczy napędu z pasywnym kompensatorem napięcia niezrównoważenia

Kompensując napięcie niezrównoważenia na zaciskach silnika eliminujemy również napięcie na wale oraz prądy łożyskowe [7]. Na Rys.9, przedstawiono napięcie w punkcie neutralnym uzwojeń silnika a na Rys.10 napięcie na wale w układzie z pasywnym kompensatorem napięcia niezrównoważenia oraz wynik długotrwałego pomiaru – brak prądu łożyskowego.



Rys.9. Napięcie niezrównoważenia  $U_N$  w układzie z pasywnym kompensatorem napięcia niezrównoważenia

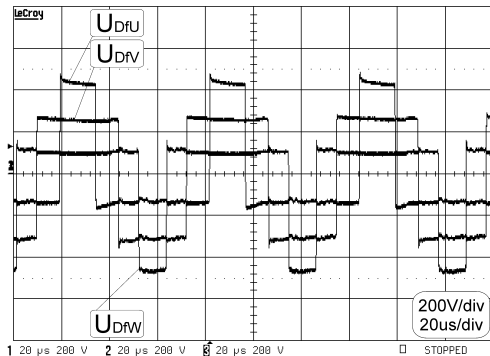


Rys.10. Napięcie na wale  $U_W$  i prąd łożyskowy  $I_L$  w układzie z pasywnym kompensatorem napięcia niezrównoważenia

Warunkiem właściwego działania filtra jest dobór odpowiednich pojemności i rezystancji w jego gałęzi poprzecznej. Jej impedancja, w zakresie częstotliwości wyższych od częstotliwości impulsowania, musi bocznikować impedancję silnika. Przy spełnieniu tego warunku prąd magnesujący  $I_m$  zamyka się w ściśle zdefiniowanym obwodzie [8]. Ze względu na wysoką częstotliwość napięcia niezrównoważenia decydujące są w nim impedancje dławików. W przypadku, gdy reaktancja indukcyjna jest znacznie większa od reaktancji pojemnościowej na szeregowo połączonych dławikach otrzymujemy spadek napięcia równy, w przybliżeniu

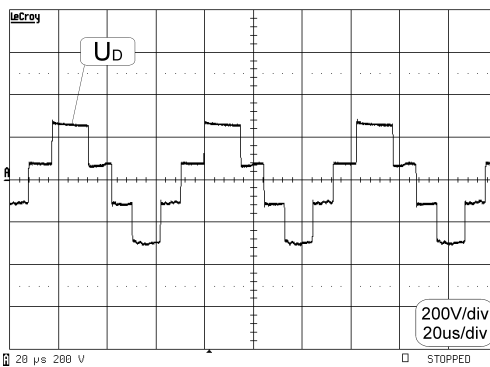
napięciu niezrównoważenia na wyjściu falownika. Indukcyjność dławika zaburzeń wspólnych powinna być wielokrotnie większa od indukcyjności dławików różnicowych. Zwiększenie indukcyjności dławika zaburzeń wspólnych nie powoduje bowiem ograniczenia użytecznych prądów typu różnicowego.

Rys.11, przedstawia spadki napięć na uzwojeniach szeregowo połączonych dławików filtrów zaburzeń wspólnych i różnicowych.



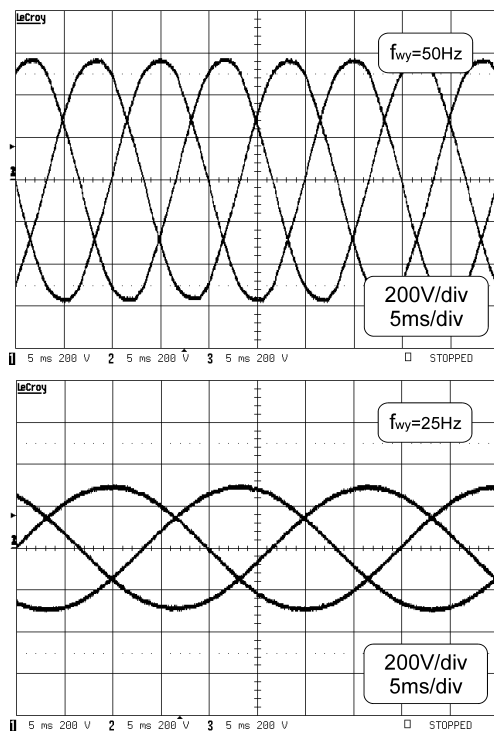
Rys.11. Spadki napięć na szeregowo połączonych dławikach filtru

Rys.12, przedstawia dodatkowe napięcie kompensujące stanowiące jedną trzecią sumy spadków napięć na uzwojeniach dławików zastosowanych w filtrze.



Rys.12. Dodatkowe napięcie kompensujące

Struktura pasywnego kompensatora napięcia zaburzeń wspólnych, zapewnia dodatkowo, sinusoidalny kształt napięć międzyfazowych. Napięcia międzyfazowe na zaciskach silnika, w układzie z pasywnym kompensatorem napięcia niezrównoważenia dla częstotliwości wyjściowych falownika 50Hz i 25Hz przy sterowaniu skalarnym ( $u/f=\text{const.}$ ) przedstawiono na Rys.13.



Rys.13. Napięcia międzyfazowe na zaciskach silnika w układzie z pasywnym kompensatorem napięcia niezrównoważenia

## 5. Wnioski

Na podstawie analizy dotyczącej mechanizmów powstawania wyładowczych prądów w łożyskach silników zasilanych z falowników PWM sformułowano następujące wnioski:

W układach napędowych z falownikami dwupoziomowymi PWM prądy łożyskowe są immanentną cechą wynikającą z chwilowej niesymetrii elektrycznej napięć wyjściowych falownika powodującej powstanie napięcia zaburzeń wspólnych w punktach neutralnych układu.

Najbardziej efektywną metodą eliminacji tych prądów jest kompensacja napięcia zaburzeń wspólnych np. za pomocą pasywnego kompensatora.

Elementy indukcyjne filtrów stosowanych do ograniczania zaburzeń wspólnych mogą powodować znaczny wzrost amplitud występujących prądów łożyskowych oraz znaczne skrócenie czasu oczekiwania na wyładowanie, co potwierdzono analizami statystycznymi dużych serii pomiarowych prądów EDM.

## 7. Literatura

- [1]. Macdonald D., Gray W.: *PWM drive related bearing failures*, IEEE Industry Appl. Magazine, July/August, 1999 s. 41-47.
- [2]. von Jouanne A., Zhang H., Wallace A. K.: *An Evaluation Techniques for Bearing Currents, EMI and Overvoltages in ASD Application*, IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 34, No. 2, September/October 1997 s.1113-1121.
- [3]. Kempski A., Smolenski R., Strzelecki R.: *Common mode current paths and their modeling in PWM inverter-fed drives*, IEEE 33rd – PESC'02, Cairns, 2002. s. 1551—1556.
- [4]. Kempski A., Strzelecki R., Smolenski R., Fedyczak Z.: *Bearing current path and pulse rate in PWM-inverter-fed induction motor*, 32<sup>nd</sup> PESC'01 Vol 4, Vancouver, Canada, 2001, s. 2025-2030.
- [5]. Kempski A., Smolenski R., Bojarski J.: *Statistical model of electrostatics discharge hazard in bearings of induction motor fed by inverter*, Journal of Electrostatics 2005, Vol. 63, s. 475-480.
- [6]. Akagi H., Hasegawa H., Doumoto T.: *Design and performance of a passive EMI filter for use with a voltage-source PWM inverter having sinusoidal output voltage and zero common-mode voltage*, IEEE 33rd – PESC'02, Cairns, 2002.
- [7]. Kempski A., Smolenski R., Kot E., Fedyczak Z.: *Active and passive series compensation of common mode voltage in adjustable speed drive system*, IAS'04, Industry Applications Conference, Seattle, September 2004.
- [8]. Kempski A., Smolenski R., Kot E., Strzelecki R.: *Series passive compensation of common mode voltage in multilevel inverter drives*, PESC'05. Recife, CD-ROM - ISBN: 0-7803-9034-2.