

# OGRANICZANIE WYSOKOCZĘSTOTLIWOŚCIOWYCH PRĄDÓW DOZIEMNYCH W NAPĘDACH Z FALOWNIKAMI NAPIĘCIOWYMI ZASILANYMI Z SIECI GÓRNICZYCH

## HIGH FREQUENCY GROUND CURRENT REDUCTION OF FREQUENCY CONVERTER DRIVES SUPPLIED FROM MINING POWER SYSTEM

Jerzy Szymański - Wydział Transportu i Elektrotechniki, Politechnika Radomska

Bernard Szymański - Dział BiR, ELPOL Centrum Elektroniki i Automatyki Sp. z o. o. w Radomiu

Zbigniew Kasztelewicz - Katedra Górnictwa Odkrywkowego, AGH, Kraków

W artykule zawarto porównanie wybranych właściwości silnikowych filtrów pasywnych LC, ograniczających wysokoczęstotliwościowe prądy doziemne płynące przez pojemności pasozytnicze kabli silnikowych i silników. Przeprowadzono badania wybranych filtrów LC stosowanych w napędach zasilanych z sieci górniczych, w układzie sieciowym typu IT. W badaniach oceniających efektywność filtracji prądów doziemnych uwzględniono takie kryteria jak: napięcie względem ziemi punktu neutralnego uzwojeń stojana silnika, prąd doziemny w przewodzie ochronnym PE oraz napięcie fazowe zasilania przemiennika częstotliwości i napięcie międzyfazowe zasilania silnika.

In the article basic features' comparison of different kinds of passive LC motor filters, utilized in order to reduce inverter's the differential and common voltage in the frequency converters drives, is presented. Filters' examinations were prepared for non-grounded power supply of electrical drives (IT mains) where parasitic ground capacitances of a screened motor cable have significant value. Filters were compared under following criteria: voltage of stator windings neutral point to grounded motors cover, high frequency parasitic current in PE conductor, value of frequency converter phase-ground and value of motor phase-phase voltage. Examinations were made for unscreened and screened motor cables.

### Wprowadzenie

Stosowanie dwupoziomowych trójfazowych falowników napięciowych z modulacją MSI niesie ze sobą wiele negatywnych konsekwencji (rys. 1) [19]. Falowniki napięciowe są generatorami trójfazowych napięć odkształconych i w konsekwencji napięcie punktu neutralnego (N'') uzwojeń stojana zasilanego silnika indukcyjnego nie jest równe zero, gdyż suma napięć fazowych falownika jest różna od zera (rys. 2). Napięcia fazowe falownika mogą być tutaj definiowane jako:  $u_{UN''}$ ,  $u_{VN''}$ ,  $u_{WN''}$  lub  $u_{UN''}$ ,  $u_{VN''}$ ,  $u_{WN''}$ .

Falowniki napięciowe wytwarzają dwa rodzaje napięć zaburzających:

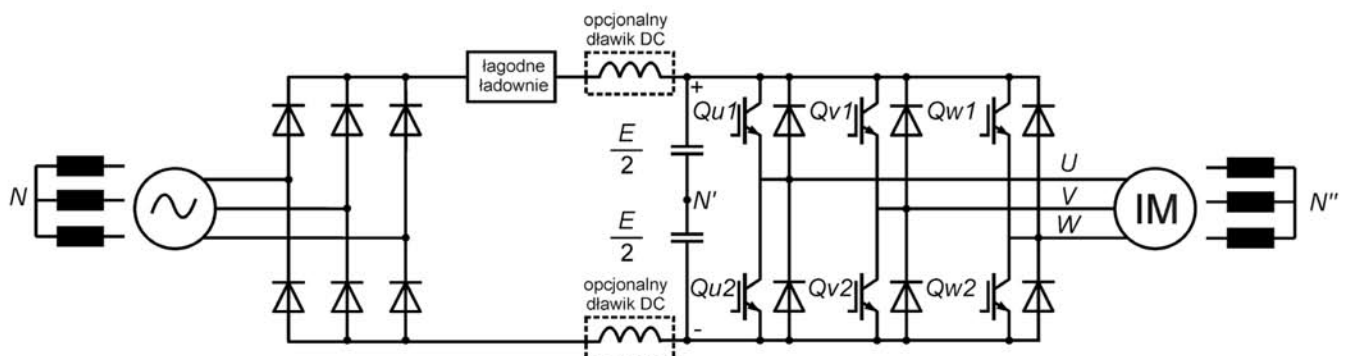
- napięcia zaburzeń różnicowych – międzyfazowych, typu

DM (ang. differential mode voltage),

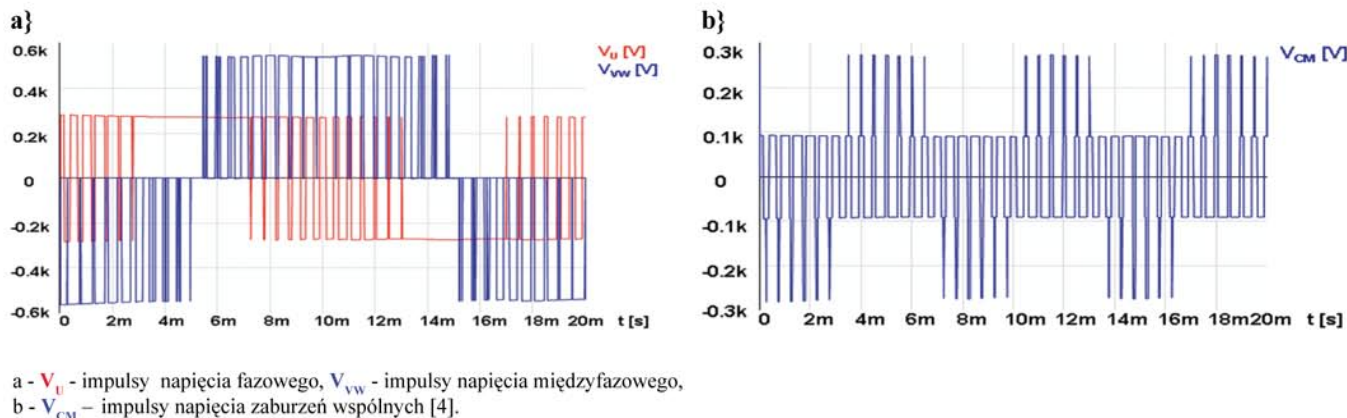
- napięcia zaburzeń wspólnych, doziemnych, typu CM (ang. common mode voltage).

Napięcie DM, to napięcie powstające pomiędzy dwiema dowolnymi fazami na wyjściu falownika mające prostokątny kształt. Im to napięcie ma większą stromość narastania ( $du_{U_{1V}}/dt$ ) i ma większą amplitudę tym większe przepięcia pojawiają się uzwojeniach stojana silnika. Przepięcia te mogą doprowadzić do zniszczenia izolacji uzwojeń stojana silnika [1], [2].

Kolejną przyczyną zaburzeń w pracy silnika i urządzeń identyfikacji zwarć doziemnych jest napięcie zaburzeń wspólnych CM. Pojawia się ono, gdyż suma napięć fazowych na wyjściu falownika nie jest równa zero. W rezultacie powstaje wtedy prąd zaburzeń wspólnych (prąd CM), który najpierw



Rys. 1. Obwód mocy komercyjnego przemysłowego trójfazowego przemiennika częstotliwości z dwupoziomowym falownikiem napięciowym MSI i silnikiem indukcyjnym



Rys. 2. Wynik symulacji przebiegu napięcia wyjściowego przemiennika częstotliwości o harmonicznej podstawie 50Hz, modulacja synchroniczna - 60° PWM:

przez pojemności doziemne kabla silnikowego i silnika, przewód ochronny PE, następnie przez pojemności doziemne układu zasilania typu IT i samego przemiennika częstotliwości dociera do obwodu prądu stałego DC zasilania falownika [1], [3], [4], [5], [20].

Napięcie zaburzeń wspólnych CM falownika jest definiowane następującym wzorem :

$$u_{CMfal} = \frac{1}{3}(u_{UN'} + u_{VN'} + u_{WN'}) \quad (1)$$

gdzie:

$u_{UN'}$ ,  $u_{VN'}$ ,  $u_{WN'}$  to napięcia fazowe pomiędzy wyjściami falownika, a punktem neutralnym N' obwodu DC.

Impulsowe przebiegi napięć fazowych powodują, że ich suma ma wartość chwilową różną od zera, i przebieg napięcia, tzw. zaburzeń wspólnych CM można opisać i zapisać w postaci nieskończonych szeregów harmonicznnych zależnością:

$$u_{CMfal} = \frac{u_{UN'} + u_{VN'} + u_{WN'}}{3} = \frac{4V_{DC}}{3\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{m} J_n \left( m \frac{\pi}{2} M \right) \sin \left( (m+n) \frac{\pi}{2} \right) \times \left( 1 + 2 \cos \left( n \frac{2\pi}{3} \right) \right) \cos(m\omega_c t + m\omega_0 t) \quad (2)$$

gdzie:

- $J_n$  – funkcja Bessela n-tego rzędu,
- $M$  – głębokość modulacji,
- $V_{DC}$  – połowa napięcia obwodu DC ( $V_{DC}=0,5E$ ),
- $m$  – rząd harmonicznnej częstotliwości wyjściowej falownika,
- $n$  – rząd harmonicznnej częstotliwości nośnej.

Napięcie zaburzeń wspólnych CM może mieć wiele negatywnych konsekwencji dla układu napędowego. Napięcie CM pomiędzy wałem silnika i łożyskami, powoduje przepływ wysokoczęstotliwościowego prądu, który może zniszczyć łożyska [6], [16]. Jeśli silnik jest uziemiony wspólnie z innymi wrażliwymi odbiornikami to wskutek zaburzenia potencjału uziemienia, może prowadzić to do zakłóceń w pracy tych odbiorników [7]. Ponadto przepływ wysokoczęstotliwościowego prądu zaburzeń CM od instalacji ochronnej, przez doziemne pojemności pasożytnicze układu zasilania, do obwodu DC zasilania falownika zakłóca pracę czujników prądów zwarć doziemnych. Dopuszczone poziomy zaburzeń przewodzonych o częstotliwościach radiowych są określone normą PN-EN

61800-3. Prądy upływu doziemnego mają częstotliwości mniejsze od częstotliwości radiowych i są zwykle ograniczone jedynie czułością stosowanych wskaźników zwarć doziemnych.

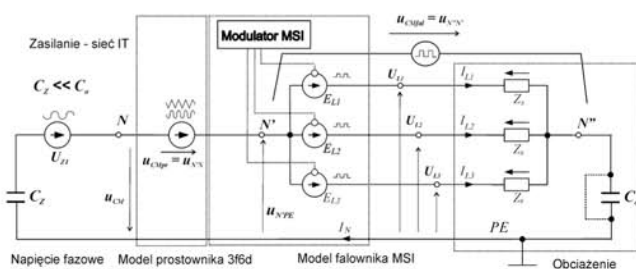
Prowadzone są badania efektywności różnych konfiguracji silnikowych filtrów pasywnych i aktywnych eliminujących nadmierny poziom zaburzeń doziemnych powodowanych falownikami w napędach zasilanych z sieci uziemionych [17], [18], [19]. Autorzy zaproponowali zastosowanie wybranych rodzajów filtrów LC i przeprowadzili weryfikację ich skuteczności w napędach z falownikami napięciowymi zasilanymi sieciami nieziemionymi, typu IT [20].

W sieciach nieziemionych o układzie sieciowym typu IT (sieci górnicze) napięcie zaburzeń wspólnych  $u_{CM}$  powoduje zniekształcenia fazowych napięć zasilania przemiennika częstotliwości. Fazowe napięcie zasilania przemiennika częstotliwości  $u_{Cz}$ , zgodnie z modelem przedstawionym na rysunku 3, można interpretować jako napięcie na doziemnej pojemności pasożytniczej po stronie zasilania przemiennika częstotliwości i można go opisać równaniem:

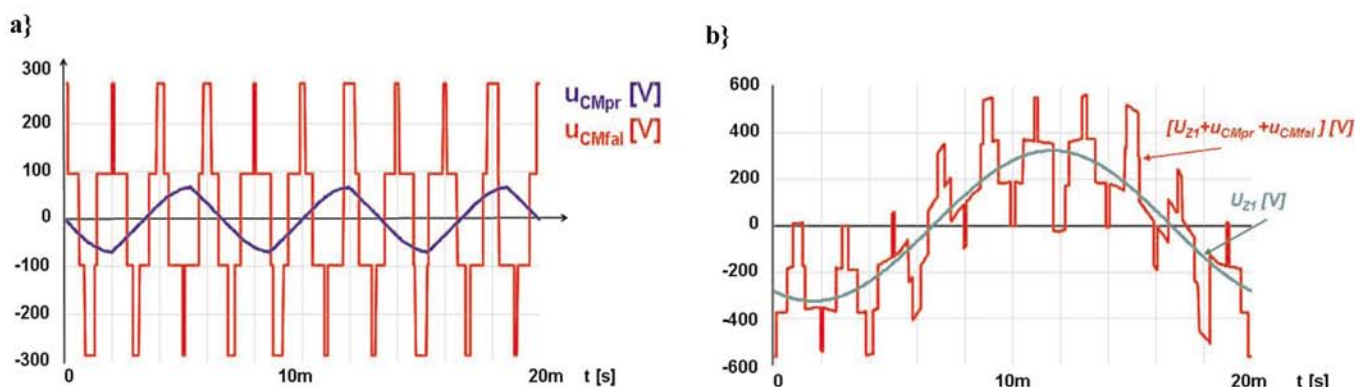
$$u_{Cz} = U_{Z1} + u_{CMpr} + u_{CMfal} \quad (3)$$

Napięcie  $u_{Cz}$  uzyskuje taki kształt jak fazowe napięcia zasilania przemiennika częstotliwości przy zasilaniu trójfazowej z sieci izolowanej o układzie sieciowym typu IT.

Falownik jest generatorem trójfazowego napięcia odkształconego, które jest kształtowane elektronicznie, np. według metody szerokości impulsów MSI o sinusoidalnym przebiegu



Rys. 3. Wysokoczęstotliwościowy model przemiennika częstotliwości MSI z obciążeniem symetrycznym zasilany z nieziemionej jednofazowej sieci zasilania.



Rys. 4. Modulowanie sinusoidalnego napięcia zasilania przez napięcia zaburzeń wspólnych  $u_{CMpr}$  i  $u_{CMfal}$  w nieziemionym układzie zasilania:  
 a – napięcie  $u_{CMpr}$  obciążonego prostownika i napięcie  $u_{CMfal}$  falownik ze współczynnikiem głębokości modulacji  $M = 0,9$ ,  $f_p = 500\text{Hz}$ ,  
 b – sinusoidalne napięcie  $U_{z1}$  i napięcie na pojemności doziemnej  $u_c$  zmodulowane napięciami zaburzeń wspólnych  $u_{CMpr}$  i  $u_{CMfal}$

modulującym, a więc falownik jest także generatorem napięcia zaburzeń wspólnych  $u_{CMfal}$ . Przy zasilaniu falownika z sieci trójfazowej poprzez prostownik, należy uwzględnić dodatkowo efekt odkształcenia fazowych napięć zasilania powodowanych prostownikiem.

Rysunek 4 przedstawia fazowe napięcie na pojemności  $C_z$  (wg rys.3), które jest odkształcone napięciami zaburzeń wspólnych przemiennika częstotliwości. W układach typu IT występuje zjawisko „plywania” potencjału punktu neutralnego  $N$  trójfazowego układu zasilania na skutek występowania napięć zaburzeń wspólnych  $u_{CM}$ . Napięcie zaburzeń wspólnych generowane przez falowniki  $u_{CMfal}$  może przyjmować różne kształty zależnie od zastosowanej metody kształtowania napięcia przemiennika i stanu obciążenia falownika:

- rysunek 4a przedstawia napięcie zaburzeń wspólnych pochodzące od obciążonego prostownika (3f6d) -  $u_{CMpr}$  i napięcie zaburzeń wspólnych pochodzące od falownika -  $u_{CMfal}$  o harmoniczej podstawowej  $50\text{Hz}$ , współczynnika głębokości modulacji  $M = 0,9$  i symetrycznym trójkątnym przebiegu nośnym  $f_p = 500\text{Hz}$ ,
- rysunek 4b przedstawia napięcie  $U_{z1}$ , które można interpretować jako napięcie fazowe zasilania przemiennika częstotliwości w układzie trójfazowym IT. W sieci trójfazowej jest ono rezultatem zmodulowania napięcia sinusoidalnego  $U_{z1}$  - np.  $230\text{V}/50\text{Hz}$  napięciem zaburzeń wspólnych wygenerowanym przez prostownik i falownik (rys.3).

Jeśli w układzie napędowym z trójfazowym przemiennikiem częstotliwości doziemne pojemności pasożytnicze po stronie obciążenia będą dużo większe od pojemności pasożytniczych po stronie zasilania, to praktycznie całe napięcie zaburzeń wspólnych odłoży się po stronie źródła zasilania i wtedy fazowe napięcia zasilania przemiennika ulegną zmodulowaniu. Z przeprowadzonej analizy wynika, że wartość maksymalna fazowego napięcia zasilania może ulec zwiększeniu o blisko połowę napięcia obwodu DC falownika. Takie napięcie może powodować uszkodzenie modułu falownika lub prostownika. Wskutek uziemienia radiatorów tych podzespołów mocy może wystąpić nadmierny stres napięciowy na wejściach zasilania tych podzespołów.

#### Badania porównawcze filtrów silnikowych LC

W przeprowadzonym badaniu porównano dwa rodzaje filtrów LC instalowanych na wyjściu falownika przemiennika częstotliwości i odniesiono do przebiegu napięcia na wyjściu

falownika bez żadnego filtru. Wykorzystano filtr LC typ DM i filtr LC typ DM-CM wyposażone opcjonalnie w dławiki z magnesami stałymi CM. Badaną konfigurację układu napędowego z przemysłowym przemiennikiem częstotliwości, filtrem LC i silnikiem klatkowym przedstawiono na rysunku 5.

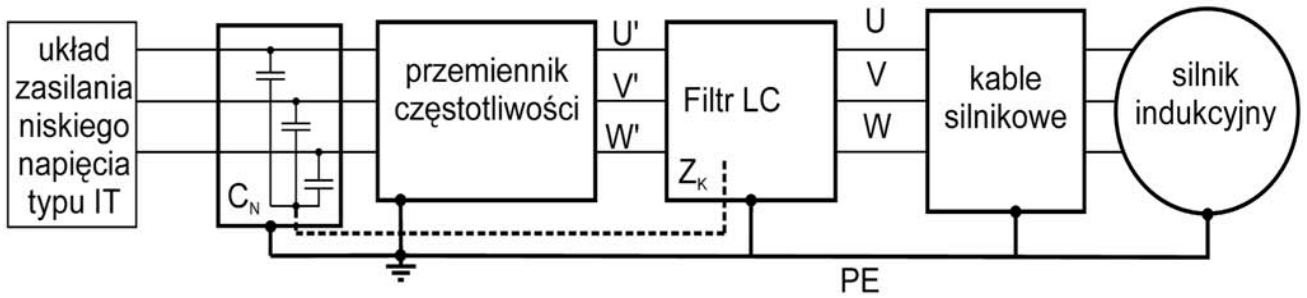
Układy napędowe dużej mocy zasilanie z nieziemionego układu zasilania typu IT, posiadające znaczące doziemne pasożytnicze pojemności, muszą mieć sztucznie wytworzony obwód przepływu wysokoczęstotliwościowych prądów doziemnych wytwarzanych napięciem zaburzającym CM falownika. W napędach małych mocy pojemności doziemne po stronie zasilania i obciążenia przemiennika częstotliwości mają zwykle porównywalne wartości, dlatego nie zachodzi zjawisko znacznego zniekształcenia napięć fazowych zasilania przemiennika częstotliwości.

Na rysunku 5 obwód ten łączy silnikowy filtr LC DM-CM i pojemnościowy filtr wejściowy składowej zerowej napięcia zasilania (linia przerywana). W tej konfiguracji prądy doziemne zamykają się w obwodzie DC modułu falownika przemiennika częstotliwości niezależnie od budowy przemiennika.

Przedstawiona konfiguracja może być wykorzystywana zarówno w układach zasilania typu TN jak i IT. W układach zasilania typu TN przy braku sztucznie wytworzonego obwodu przepływu wysokoczęstotliwościowych prądów doziemnych, przepływa on przewodem ochronnym PE do uziemionego punktu neutralnego uzwojenia wtórnego transformatora zasilania zakłócając pracę ochronnych wyłączników różnicowoprądowych lub przekładników prądowych.

W nieziemionych układach zasilania, o układzie sieciowym IT, przepływ wysokoczęstotliwościowych prądów doziemnych z filtra LC typu DM-CM do wejściowego filtra składowej zerowej napięcia zasilania przemiennika częstotliwości, z udziałem przewodu ochronnego PE, uniemożliwia pracę napędu przy wystąpieniu pojedynczego zwarcia doziemnego, tak po stronie zasilania przemiennika częstotliwości, jak i silnika. Metody wykrywania zwarć doziemnych w napędach przekształtnikowych zasilanych z sieci IT nie są przedmiotem tego artykułu [26].

W sieciach izolowanych układ napędowy z rysunku 5 może być powszechnie wykorzystywany gdyż umożliwia zamknięcie prądów zaburzających CM bez ingerowania w strukturę wewnętrzną przemiennika częstotliwości. Zaburzenia wysokoczęstotliwościowe według rysunku 5 zostają zamknięte w układzie przemiennika częstotliwości – filtr LC i nie przepływają przez pozostałe elementy systemu zasilania napędu.



Rys.5. Układ napędowy z filtrem LC do ograniczania zaburzeń DM i CM z obwodem zamykania prądów doziemnych przez wejścia zasilania przemiennika częstotliwości [25].

Celem badań jest określenie skuteczności filtracji napięcia zaburzeń CM filtrów LC typu DM-CM. Należy zwrócić uwagę, że przy nieobciążonym przemienniku częstotliwości może nastąpić niepożądany wzrost napięcia w jego obwodzie DC, dlatego przy stosowaniu filtracji napięcia zaburzeń wspólnych filtrami LD typu DM-CM i układzie połączeń jak na rysunku 5, przemiennik częstotliwości powinien być obciążony lub bateria kondensatorów obwodu DC musi być rozładowywana przy przekroczeniu dopuszczalnej wartości jej napięcia, np. przerywaczem prądu odciażonym rezystorem mocy.

#### Dolnoprzepustowy filtr LC dla napięcia zaburzeń typu DM

Standardowy filtr zaburzeń typu DM zawiera 3-fazowy dławik  $3xL_{sin}$  oraz kondensatory  $3xC_{sin}$  włączone pomiędzy fazy. Ten typ filtra ma mały wpływ na zakłócenia typu CM. Przy doborze wartości elementów filtra powinna być spełniona zależność .

$$f_n \geq k \cdot f_r = k \cdot \frac{1}{2\pi \sqrt{2L_{sin} \cdot \frac{1}{2} C_{sin}}} = k \cdot \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{sin} \cdot C_{sin}}} \quad (4)$$

gdzie:

$f_n$  - częstotliwość nośna modulacji MSI falownika,

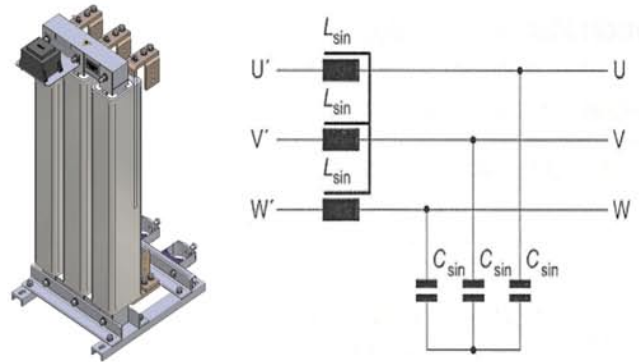
$f_r$  - częstotliwość rezonansowe filtra utworzonego przez szeregowe połączenie dwóch indukcyjności  $L_{sin}$  i dwóch pojemności  $C_{sin}$ .

Współczynnik  $k$  zwiększa skuteczność filtracji napięcia zaburzeń różnicowych, powiększając prąd międzyfazowy dla harmonicznej podstawowej (50Hz) i zwykle jest przyjmowany w przedziale 10 – 20. W praktyce inżynierskiej można przyjmować częstotliwości rezonansową filtra LC o wartości ok.  $f_r = 1\text{kHz}$  bez uwzględniania współczynnika korekcyjnego  $k$ .

Z zależności (4) wynika, że dla filtra trójfazowego o parametrach  $I_n = 16\text{A}/400\text{V}$  o dławiku powodującym 5% spadek napięcia harmonicznej podstawowej (50Hz) zasilania silnika oraz częstotliwości nośnej modulacji MSI falownika  $f_n = 4\text{kHz}$ , należy dobrać  $L_{sin}$  i  $C_{sin}$  o wartościach według zależności (5).

$$L_{sin} = \frac{\Delta U}{\omega_{h1} \cdot I_n} = \frac{20\text{V}}{2\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot 16\text{A}} = 4\text{mH}$$

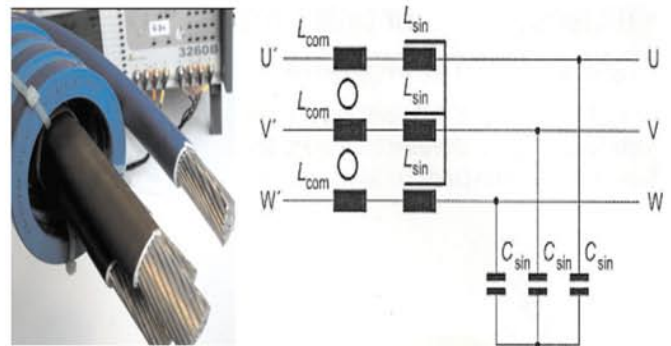
$$C_{sin} = k \cdot \frac{1}{\omega_{fn}^2 L_{sin}} = 10 \cdot \frac{1}{(2\pi \cdot 4\text{kHz})^2 \cdot 4\text{mH}} = 4,0\mu\text{F} \quad (5)$$



Rys.6. Przemysłowy filtr LC typ DM stosowany do uzyskiwania sinusoidalnego napięcia międzyfazowego zasilania silnika

#### Dolnoprzepustowy filtr LC dla napięcia zaburzeń typu DM-CM z pierścieniami ferrytowymi

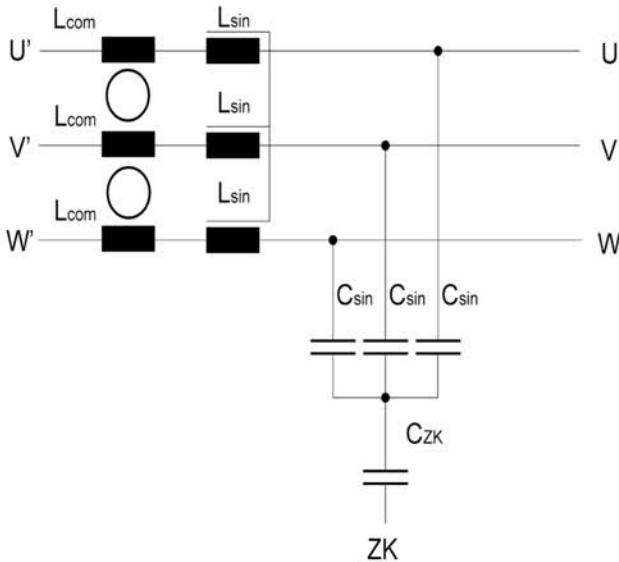
W filtry zastosowano dodatkowe trzy indukcyjności  $3xL_{com}$ , które są nawinięte na jeden rdzeń magnetyczny (rys.7). Pozwalają one na indukcyjne tłumienie prądu zaburzeń CM, głównie w paśmie częstotliwości radiowych ok. 150kHz–30MHz, gdzie impedancja dławika  $L_{com}$  jest większa od  $1\text{k}\Omega$  [9], [21], [22], [23]. W rozwiązaniach przemysłowych stosuje się kilka pierścieni ferromagnetycznych (np. 4 pierścieniowe rdzenie magnesu neodymowego) przez które są przewleczone żyły fazowe kabla silnikowego. Filtr LC z indukcyjnościami do tłumienia zaburzeń wspólnych przedstawiono na rysunku 7. Działanie dławików  $L_{com}$  polega na zmniejszeniu stromości narastania impulsów prądowych i zmniejszeniu ich wartości maksymalnej. Wartości indukcyjności dławików  $L_{com}$  w postaci pierścieni z magnesów stałych (np. magnesy neodymowe) zwykle wynoszą kilka  $\mu\text{F}$  i znajdują zastosowanie głównie jako komponenty filtrów radioelektrycznych.



Rys.7. Przemysłowy filtr LC typ DM stosowany do uzyskiwania sinusoidalnego napięcia międzyfazowego zasilania silnika z dodatkowymi indukcyjnościami  $3xL_{com}$  do tłumienia zaburzeń CM w paśmie radiowym

### Dolnoprzepustowy filtr LC dla zaburzeń typu DM-CM z kondensatorem sprzęgającym

Filtr dolnoprzepustowy dla zaburzeń typu DM-CM przedstawiony na rysunku 8, posiada dodatkowy kondensator włączony pomiędzy kondensatory tłumienia zaburzeń DM oraz wejściowy filtr pojemnościowy (np.  $3 \times 2 \mu F$ ) (rys. 5). Filtr ten ogranicza zakłócenia typu DM i CM. Filtr uniemożliwia przepływ doziemnych prądów zaburzających przez pojemności pasożytnicze kabla zasilania silnika i samego silnika [8], [10], [11]. Ponadto prądy zaburzeń wspólnych CM nie przepływają też przez doziemne pojemności pasożytnicze transformatora zasilającego przemiennik częstotliwości. Nie występują wtedy zaburzenia fazowych napięć zasilania przemiennika częstotliwości. Taki filtr cechuje się dużą skutecznością ograniczania zaburzeń wspólnych CM w sieciach IT. W przemysłowych rozwiązaniach można spotkać bezpośrednie połączenie pojemności sprzęgającej  $C_{ZK}$  bezpośrednio do przewodu ochronnego PE i nie ma wówczas wydzielonego przewodu dla prądów zaburzeń wspólnych CM. Jeśli z obwodu DC zasilania falownika przemiennika częstotliwości są wyprowadzone pojemności sprzęgające od biegunów + DC i -DC to można wtedy bezpośrednio połączyć punkt ZK filtra z tymi pojemnościami. Eliminuje to konieczność stosowania trójfazowego pojemnościowego filtra na wejściach zasilania przemiennika częstotliwości, jak na rysunku 5 [12], [13], [14], [15].



Rys.8. Przemysłowy filtr LC typ DM stosowany do uzyskiwania sinusoidalnego napięcia międzyfazowego zasilania silnika z dodatkowymi indukcyjnościami  $3xL_{com}$  i pojemnością sprzęgającą  $C_{ZK}$  do tłumienia napięcia zaburzeń CM

### Rezultaty badań

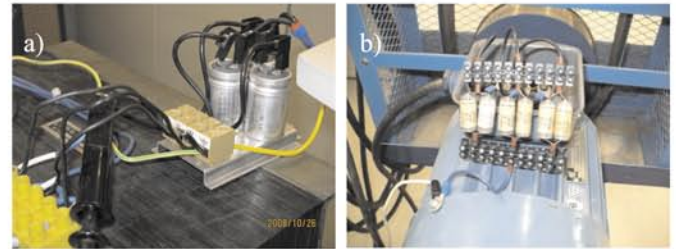
W badaniach używano przemiennikowy układ napędowy przedstawiony na rysunku 5 stosując omówione wcześniej filtry pasywne LC. Użyty był przemiennik częstotliwości o mocy 2,2kW bez filtrów wewnętrznych. Częstotliwość przełączania wynosiła  $f_n = 4,5kHz$ . Harmoniczna podstawowa międzyfazowego napięcia wyjściowego falownika wynosi 50Hz (współczynnik głębokości modulacji  $M=1$ ). Użyty silnik o mocy 2,2kW jest bez izolowanych łożysk na wale. W badaniach wykorzystano przemysłowy filtr LC typ DM, który był modyfikowany dla potrzeb badań, o  $I_N = 16A$  dla częstotliwości  $f_n = 4kHz-6kHz$ . Zmierzone pasożytnicze pojemności doziemne

na wejściach zasilania przemiennika częstotliwości wynosiły 4-6nF. Sieć zasilająca typu IT zbudowana z zastosowaniem transformatora separującego 10kVA.

Wejściowy filtr pojemnościowy jak na rysunku 9a został wykonany poprzez włączenie kondensatorów  $3 \times 1 \mu F$  między napięcia fazowe transformatora separującego a punkt gwiazdowy filtra był dołączany do przewodu  $C_N-Z_K$ .

Kabel silnikowy nieekranowany  $4 \times 4mm^2$ , długość 10mb. Pojemności międzyprzewodowe i doziemne na zaciskach silnika wynoszą 4-6nF.

Dla określenia wpływu ekranowanego kabla silnikowego o dużym przekroju użyto dodatkowych kondensatorów dołączonych do zacisków silnika o wartościach:  $3 \times 19nF$  – pojemności międzyprzewodowe,  $3 \times 32nF$  – pojemności doziemne. Odpowiadają one parametrom ekranowanego kabla silnikowego  $4 \times 50mm^2 / 100mb$  [24] (rys. 9b).



Rys. 9. Elementy układu laboratoryjnego do badania właściwości silnikowych filtrów LC w napędzie z przemiennikiem napięciowym zasilanym z sieci nieziemionej typu IT  
a. realizacja wejściowego filtra pojemnościowego przemiennika częstotliwości,  
b. realizacja sztucznego wymuszenia doziemnych pojemności pasożytniczych kabla silnikowego.

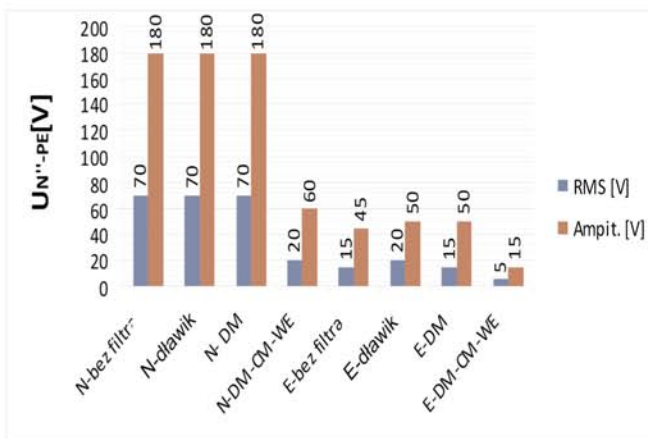
Badania dla układów z silnikowymi filtrami LC przeprowadzono dla kabla silnikowego nieekranowanego (N) i ekranowanego kabla silnikowego (E) w konfiguracji:

- 1 - bez filtra,
- 2 - dławik silnikowy (rys. 6 – filtr LC typ DM bez kondensatorów),
- 3 - filtr LC typ DM (rys. 6),
- 4 - filtr LC DM-CM-WE (rys. 5 i rys. 8,  $C_{ZK}=10\mu F$ ).

### Napięcie względem ziemi punktu neutralnego uzwojeń stojana silnika i prąd doziemny w przewodzie ochronnym PE

Pomiar napięcia zaburzeń wspólnych między punktem neutralnym uzwojeń stojana połączonych w gwiazdę i uziemionym korpusem silnika wskazuje, że filtry pasywne LC z połączonym kondensatorem sprzęgającym  $C_{ZK}$  do obwodu DC lub do wejściowego filtra pojemnościowego pozwalają na największe zmniejszenie napięcia zaburzeń CM w silniku. Same dławiki silnikowe nie wpływają na zmniejszenie napięcia między uziemionym korpusem silnika i punktem neutralnym uzwojeń stojana, co wpływa negatywnie na prace łożysk wału silnika, gdyż nie występuje tu zmniejszenie wartości prądu łożyskowego.

Filtry ograniczające napięcie zaburzeń CM silnika ograniczają jednocześnie prąd doziemny przepływający przez doziemne pojemności pasożytnicze kabla silnikowego (rys.11). Najkorzystniejsze właściwości ma filtr LC typ DM-CM według konfiguracji z rysunku 5, gdyż zapewnia drogę przepływu prądów pasożytniczych poza przewodem ochronnym PE, a tym samym napęd może pracować przy wystąpieniu pojedynczego



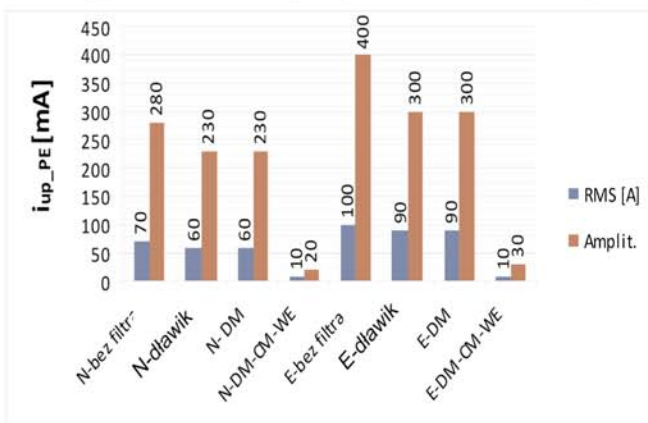
Rys.10. Wykres zależności napięcia między punktem neutralnym uzwojeń stojana silnika i uzziemioną obudową silnika  $U_{N'-PE}$  dla nieekranowanego (N) i ekranowanego (E) kabla silnikowego

zwarcia doziemnego.

Filtr LC typu DM-CM posiadający połączenie z przewodem ochronnym PE przewodzi w części tego przewodu prądy filtra i tym samym uniemożliwia pracę napędu przy zwarcu doziemnym po stronie zasilania jak i silnika.

**Fazowe napięcia zasilania przemiennika częstotliwości**

Doziemne pojemności pasożytnicze powodują powstawanie wysokoczęstotliwościowych prądów w instancji ochronnej napędu z przemiennikiem częstotliwości. Duże pojemności doziemne silnikowych kabli ekranowanych powodują, że duża część napięcia zaburzeń wspólnych odkłada się na relatywnie



Rys.11. Wysokoczęstotliwościowe prądy zaburzeń w przewodzie ochronnym PE dla nieekranowanego (N) i ekranowanego (E) kabla silnikowego

mniejszych pojemności doziemnych po stronie zasilania przemiennika częstotliwości. Powoduje to przesuwanie się względem ziemi nieuziemionego punktu neutralnego uzwojenia wtórnego transformatora. Do napięcia fazowego transformatora dodaje się odwrócone napięcie zaburzeń wspólnych, co zwiększa wartość skuteczną fazowych napięć zasilania przemiennika częstotliwości.

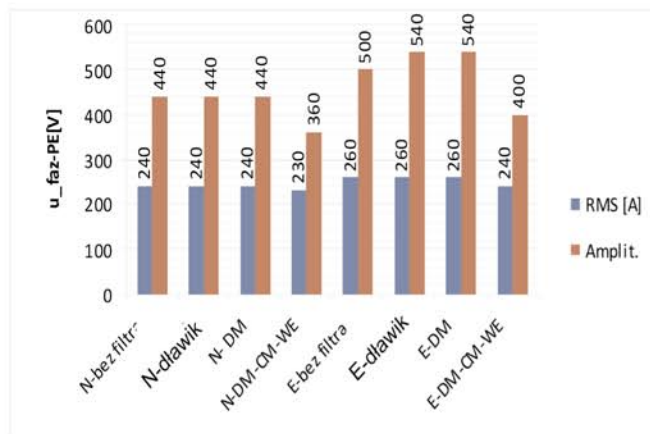
W napędach z napięciowymi przemiennikami częstotliwości bez filtrów LC należy spodziewać się dużych wartości chwilowych fazowych napięć zasilania przemienników częstotliwości w szczególności przy długich kablach silnikowych, dużych mocach silników i wysokich napięciach zasilania (np. 3x690V).

Badane pasywne filtry LC typu DM-CM skutecznie ograniczają wartości maksymalne fazowych napięć zasilania

przemiennika częstotliwości przybliżając ich kształt do przebiegu sinusoidalnego (230V/50Hz). Ich stosowanie wydaje się być szczególnie uzasadnione w napędach większych mocy z ekranowanymi kablami silnikowymi.

**Napięcie międzyfazowe silnika zasilanego z przemiennika częstotliwości**

Stwierdzono, że istotnym mankamentem stosowania filtrów pasywnych napięcia zaburzeń wspólnych DM i CM jest obniżenie międzyfazowego napięcia zasilania silnika. Przy nominalnym obciążeniu silnika następuje obniżenie jego napięcia zasilania o ok. 15%, zarówno przy stosowaniu kabli

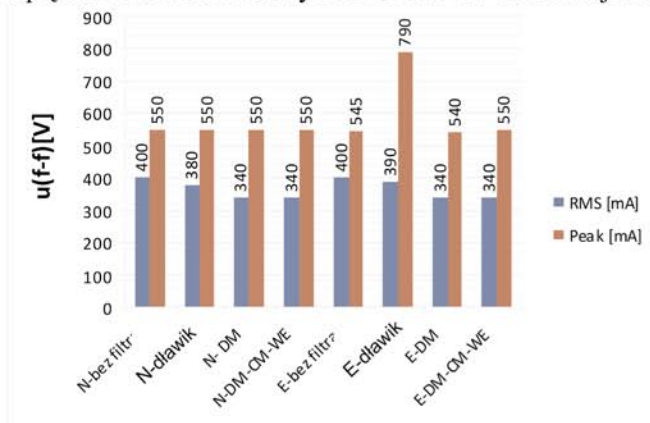


Rys.12. Wykres zależności fazowego napięcia zasilania przemiennika częstotliwości przy dla nieekranowanym (N) i ekranowanym (E) ablu silnikowym (sieć IT - 3x400V/50Hz)

silnikowych nieekranowanych jak i ekranowanych (rys.13). Aby zminimalizować skutki pracy filtra LC należy dokonać powiększenia tego napięcia poprzez zastosowanie przemodulowania w algorytmie modulacji falownika MSI.

**4. Wnioski**

W artykule porównano wybrane właściwości pasywnych filtrów silnikowych LC stosowanych w napędach z napięciowymi przemiennikami częstotliwości. W szczególności badano skuteczność filtrów LC w górniczych układach zasilania o układzie sieciowym typu IT. Badano filtr LC do redukcji napięcia zaburzeń różnicowych DM i filtr LC do redukcji na-



Rys.13. Wykres zależności napięcia międzyfazowego silnika od rodzaju filtra LC dla nieekranowanego (N) i ekranowanego (E) kabla silnikowego

pięcia zaburzeń wspólnych CM, które są instalowane między falownikiem napięciowym i silnikiem.

Filtr pasywny LC typ DM-CM włączony w układzie (rys.4) okazał się najkorzystniejszym rozwiązaniem i stosowanie takiej konfiguracji umożliwi pracę napędu przy pojedynczym zwarciu doziemnym, tak po stronie zasilania jak i silnika.

Badane filtry pasywne LC typu DM-CM skutecznie ograniczają napięcie zaburzeń wspólnych silnika, prądy pasożytnicze w przewodzie ochronnym PE i odkształcenia fazowych napięć zasilania przemiennika częstotliwości.

Istotną cechą niekorzystną filtrów pasywnych LC typ DM-CM jest 15% zmniejszenie międzyfazowego napięcia zasilania silnika niezależnie od jego obciążenia, co w warunkach przemysłowych należy kompensować nadmodulacją falownika MSI.

Autorzy wykorzystali omówione w artykule metody ograniczania wpływu napięcia zaburzeń wspólnych na wartości maksymalne napięć zasilania przemienników częstotliwości dużej mocy (450kW/500V) w stacjach zasilania silników głównych przENOŚNIKÓW TAŚMOWYCH o regulowanej prędkości taśmy [25]. Zastosowane rozwiązanie wpłynęło na zmniejszenie awaryjności przemienników częstotliwości. Ponadto zwiększyła się niezawodność urządzeń elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej zainstalowanej w kontenerowej stacji napędowej, w której całkowita moc napędów przekształtnikowych wynosiła blisko 2MVA.

## Literatura

- [1] VON JOUANNE, A. and ENJETI, P. Design considerations for an inverter output filter to mitigate the effects of long motor leads in ASD applications. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1996. APEC '96. Conference Proceedings 1996., Eleventh Annual, 1996
- [2] HUPPUNEN, J. Sine wave filter for PWM inverter driven medium speed solid-rotor induction motors. 1999
- [3] MACDONALD, D. and GRAY, W. A practical guide to understanding bearing damage related to PWM drives. Pulp and Paper Industry Technical Conference, 1998. Conference Record of 1998 Annual, 1998
- [4] KEMPSKI, A.; SMOLENSKI, R.; and STRZELECKI, R. Common mode current paths and their modeling in PWM inverter-fed drives. Power Electronics Specialists Conference, 2002. pesc 02. 2002 IEEE 33rd Annual, 2002
- [5] CHEN, S.; LIPO, T.; and FITZGERALD, D. Modeling of motor bearing currents in PWM inverter drives. Industry Applications, IEEE Transactions on, 1996
- [6] BUSSE, D.; ERDMAN, J.; KERKMAN, R.; SCHLEGEL, D.; and SKIBINSKI, G. The effects of PWM voltage source inverters on the mechanical performance of rolling bearings. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1996. APEC '96. Conference Proceedings 1996., Eleventh Annual, 1996
- [7] SKIBINSKI, G.; KERKMAN, R.; and SCHLEGEL, D. EMI emissions of modern PWM AC drives. Industry Applications Magazine, IEEE, 1999
- [8] CHEN, S.; LIPO, T.; and FITZGERALD, D. Source of induction motor bearing currents caused by PWM inverters. Energy Conversion, IEEE Transaction on, 1996
- [9] AG, S. DE 295 06 951 U, 1995. Deutsches Gebrauchsmuster
- [10] ZHONG, E. and LIPO, T. Improvements in EMC performance of inverter-fed motor drives. Industry Applications, IEEE Transactions on, 1995
- [11] HUPPUNEN, J. and PYRHONEN, J. Filtered PWM-inverter drive for high-speed solid-rotor induction motors. Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE, 2000
- [12] CHEN, X.; XU, D.; LIU, F.; and ZHANG, J. A Novel Inverter-Output Passive Filter for Reducing Both Differential- and Common-Mode dv/dt at the Motor Terminals in PWM Drive Systems. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2007
- [13] AKAGI, H. and TAMURA, S. A Passive EMI Filter for Eliminating Both Bearing Current and Ground Leakage Current From an Inverter-Driven Motor. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2006
- [14] RENDUSARA, D. and ENJETI, P. An improved inverter output filter configuration reduces common and differential modes dv/dt at the motor terminals in PWM drive systems. Power Electronics, IEEE Transactions on, 1998
- [15] SWAMY, M. and KUME, T. Common-mode current attenuation techniques for use with PWM drives. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1999. APEC '99. Fourteenth Annual, 1999
- [16] BINDER, A. Abschlussbericht: Elektrische Lagerbeanspruchung bei umrichter-gespeisten Maschinen. Tech. rep., TU Darmstadt, 2003
- [17] KAMPEN, D. and PARSPOUR, N. and BEYER, S. and LAUDAHN, S. Efficiency of Motor Side Common Mode (CM) Filtering Techniques for PWM Inverters. PCIM - Nuremberg, Germany, 2009
- [18] HONGFEI, M. and DIANGUO, X. LIJIE, M. Suppression Techniques of Common-Mode Voltage Generated by Voltage Source PWM Inverter. Power Electronics and Motion Control Conference, IPERC, IEEE Transactions on, 2004.
- [19] SWAMY, M. and KUME, T. Present state and futuristic vision of motor drive technology. Optimization of Electrical and Electronic Equipment, IEEE Transactions on, 2008. OPTIM 2008
- [20] SZYMANSKI, J. Stosowanie filtrów EMC w sieciach IT zasilających napędy z napięciowymi przemiennikami częstotliwości (eng. EMC filters usage in IT mines with voltage frequency converters). elektro.info, Nr 12, 2008, www.elektro.info.pl
- [21] Muetze, A. Scaling Issues for Common Mode Chokes to Mitigate Ground Currents in Inverter- Based Drive Systems. IEEE Industrial Applications Society 40th Annual Meeting, Hong Kong, October 2-6, 2005
- [22] MAGNETIC Magnet-Technologie, COOL BLUE, PB-CB, Magnetic GmbH, 2009
- [23] VAC Vacuumschmelze – specification – Item Nr T60405-S6123-X163, 2011

- [24] HELUKABEL, katalog „Kable i przewody 2009/2010”, www.helukabel.pl – 2011
- [25] SZYMANSKI, J., Zgłoszenie nr P.394803 - Filtr napięcia zaburzeń wspólnych napięciowych elektronicznych przetwornic częstotliwości zasilanych z trójfazowej sieci nieziemionej typu IT, 2011
- [26] RODRIGUEZ-Valdez C.D., Kerkman R.J. Method to detect line-to-ground faults in high-resistance-ground networks. Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE , Atlanta, GA-USA, 12-16 Sept. 2010

Artykuł recenzował prof. dr hab. inż. Eugeniusz Rosołowski  
Rękopis otrzymano 10.08.2011 r. \*2206

