

## Efektywność tłumienia zaburzeń doziemnych filtrów silnikowych LC w napędach z falownikami napięciowymi zasilanymi z sieci IT

*W artykule zawarto porównanie wybranych właściwości silnikowych filtrów pasywnych LC, ograniczających prądy doziemne kabli silnikowych i silników, w napędach z napięciowymi przemiennikami częstotliwości. Przeprowadzono badania filtrów LC stosowanych w napędach zasilanych z sieci nieziemionych typu IT. W badaniach oceniających efektywność filtracji napięcia zaburzeń wspólnych uwzględniono takie kryteria jak: napięcie względem ziemi punktu neutralnego uzwojeń stojana silnika i prąd doziemny w przewodzie ochronnym PE oraz napięcie fazowe i międzyfazowe na zaciskach silnika.*

### 1. WPROWADZENIE

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

Falowniki napięciowe wytwarzają dwa rodzaje napięć zaburzających. Pierwszym z nich jest napięcie zaburzeń typu DM (ang. *differential mode voltage* – napięcia zaburzeń różnicowych). Napięcie DM, to napięcie powstające pomiędzy dwoma dowolnymi fazami na wyjściu falownika mające prostokątny kształt. Im to napięcie ma większą stromosć narastania ( $du_{U-V}/dt$ ) 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 (ang. *common mode voltage*

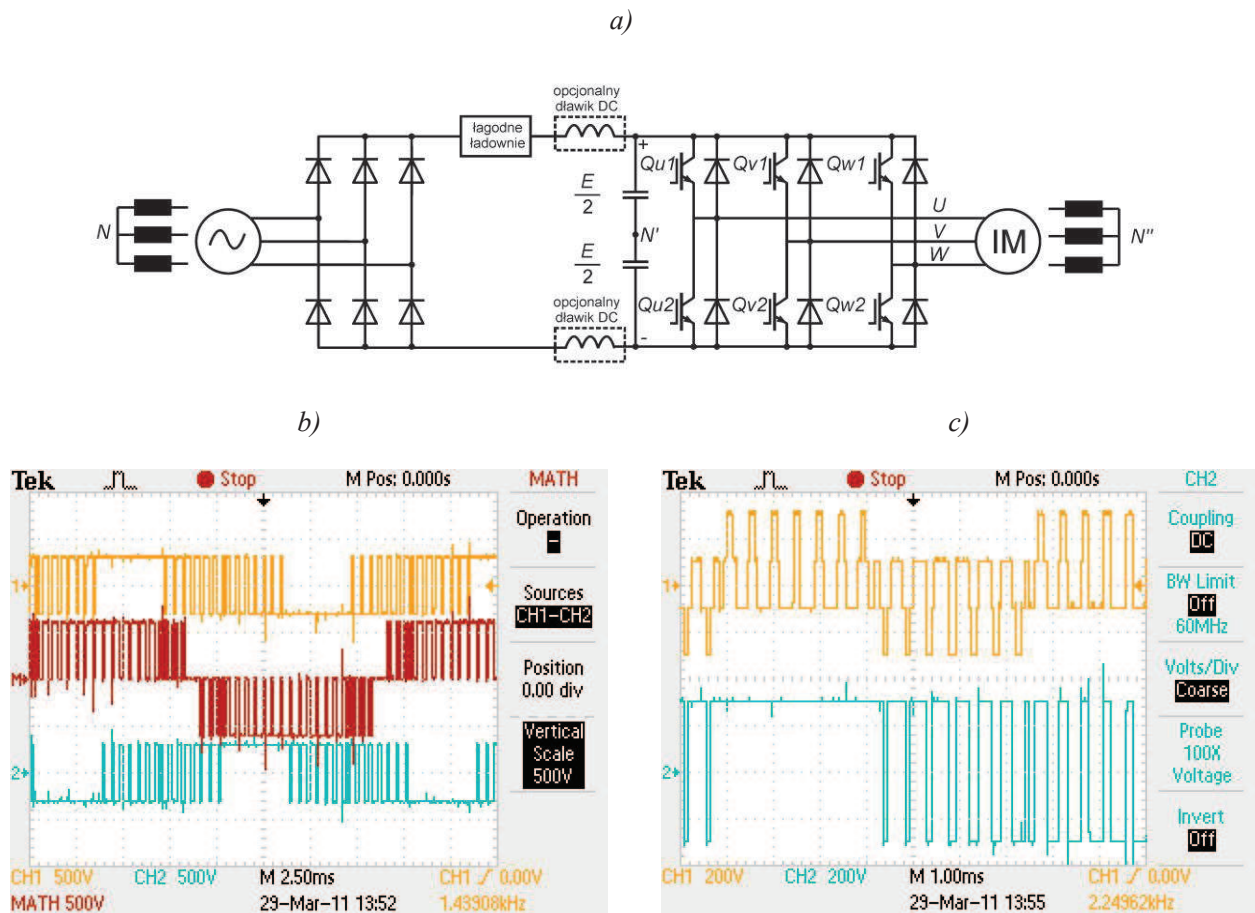
– napięcia zaburzeń wspólnych). Pojawia się ono wówczas, gdy suma napięć fazowych na wyjściu falownika nie jest równa zero. W rezultacie powstaje wtedy prąd zaburzeń wspólnych (prąd CM), który najpierw przez pojemności doziemne kabla silnikowego i silnika, następnie przez pojemności doziemne układu zasilania typu IT i samego przemiennika częstotliwości dociera do obwodu prądu stałego DC zasilania falownika [1], [3], [4], [5], [20]. Napięcie zaburzeń wspólnych CM jest definiowane następującym wzorem:

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

gdzie:

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

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



Rys. 1. Obwód mocy przemysłowego trójfazowego przemiennika częstotliwości z dwupoziomym falownikiem napięciowym MSI i silnikiem indukcyjnym oraz przebiegi napięć zasilania silnika

a) schemat przemiennika częstotliwości w układzie napędowym z niezziemionym układem zasilania typu IT,

b) napięcia fazowe falownika:  $u_{UN'}$  – 1,  $u_{VN'}$  – 2 i napięcie międzyfazowe  $u_{UV}$  – M,

c) napięcie zaburzeń wspólnych (doziemnych) falownika

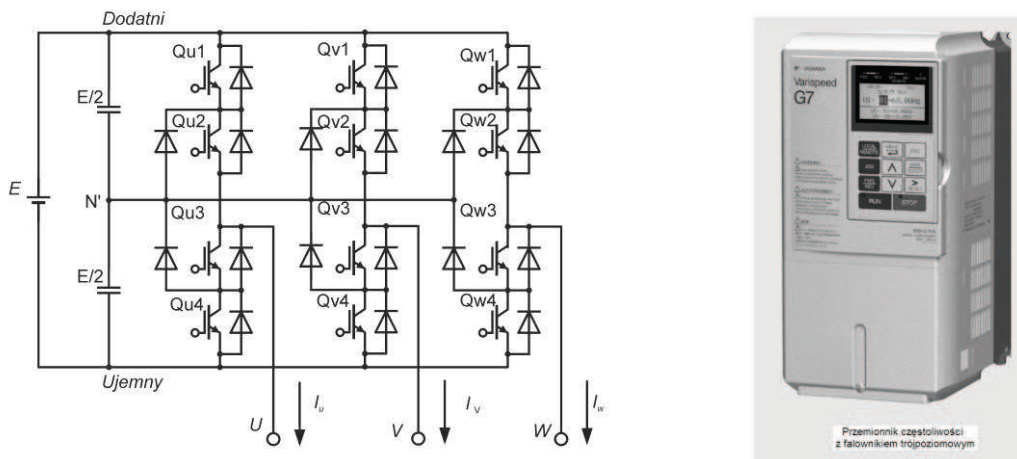
$$u_{CM} = 1/3(u_{UN'} + u_{VN'} + u_{WN'}) - 1 \text{ i napięcie fazowe falownika } u_{UN'} - 2$$

instalacji ochronnej, przez doziemne pojemności pasożytnicze układu zasilania do obwodu DC zasilania falownika zakłóca pracę czujników prądów zwarć doziemnych. Dopuszczalne 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 zasilanych sieciami niezziemionymi, typu IT [20].

## 2. FALOWNIKI NAPIĘCIOWE JAKO WYSOKOCZĘSTOTLIWOŚCIOWE GENERATORY NAPIĘĆ ZABURZAJĄCYCH

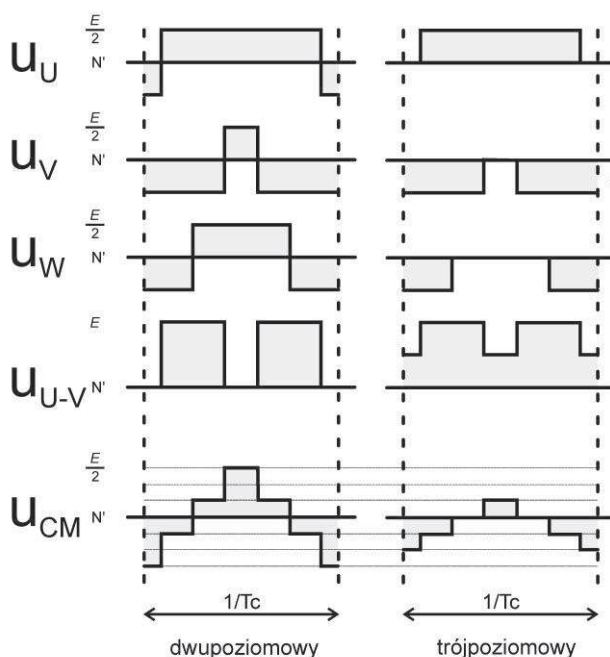
Obecnie powszechnie wykorzystywane są niskonapięciowe falowniki dwupoziomowe do zasilania silników indukcyjnych i silników synchronicznych z magnesami trwałymi. Falowniki MSI są jednocześnie głównymi źródłami wysokoczęstotliwościowych zaburzeń CM i DM, gdyż są generatorami trójfazowych napięć odkształconych o dużych częstotliwościach. W napędach z przemiennikami częstotliwości niskich napięć sporadycznie stosowane są falowniki trójpoziomowe. Większa liczba poziomów napięciowych falownika ogranicza napięcia zaburzeń wspólnych CM i ich oddziaływanie zaburzające ulega istotnemu zmniejszeniu ze względu na mniejsze wartości przełączanych napięć. Schemat obwodu mocy falownika trójpoziomowego przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Struktura trójfazowego trójpoziomowego falownika napięciowego i realizacja przemiennika częstotliwości 1,5 kW/3 × 400 V z trójpoziomym falownikiem (dostępne są moce do 300 kW [21])

Falowniki trójpoziomowe w napędach przemysłowych niskich napięć ze względu na większe koszty ich budowy i bardziej skomplikowane sterowanie MSI to ciągle jeszcze przyszłość. Niemniej mają one istotne korzyści ze względu na mniejszą zawartość harmonicznym jak i dwukrotnie mniejszej amplitudzie napięcia

zaburzeń wspólnych CM. Przebieg napięć fazowych, napięcia międzyfazowego i napięcia zaburzeń wspólnych CM falownika dwu- i trójpoziomowego przedstawiono na rysunku 3.

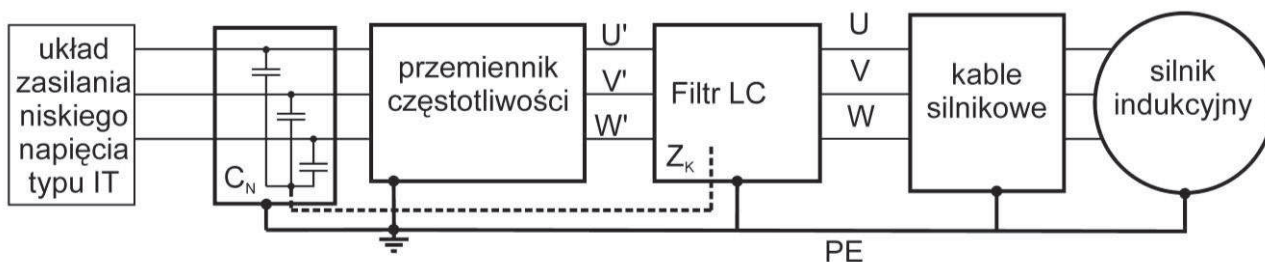


Rys. 3. Przebiegi czasowe napięć fazowych, napięcia międzyfazowego i napięcia zaburzeń wspólnych CM trójfazowego falownika napięciowego dwu- i trójpoziomowego

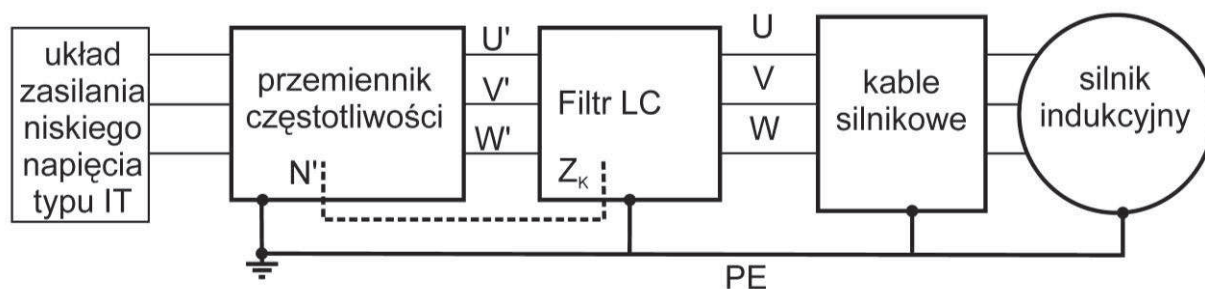
Poszukiwanie rozwiązań technicznych filtrów do ograniczania napięcia zaburzeń typu DM i CM powodowanych falownikami napięciowymi MSI jest zagadnieniem aktualnym i ważnym. Dwupoziomowe falowniki niskonapięciowe są już powszechnie stosowane w napędach, a moce jednostkowe sięgają 2000 kVA/690 V.

### 2.1. 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 filtra.



Rys. 4. Układ napędowy z filtrem LC do ograniczania zaburzeń DM i CM z obwodem zamykania prądów doziemnych przez wejścia zasilania przemiennika częstotliwości



Rys. 5. Układ napędowy z filtrem LC do ograniczania zaburzeń DM i CM z obwodem zamykania prądów doziemnych przez obwód DC przemiennika częstotliwości

Wykorzystano filtr LC typ DM i filtr LC typ DM-CM wyposażone opcjonalnie w dławiki z magnesami stałymi CM lub transformator CM z magnesami stałymi. Badane konfiguracje układów napędowych z przemysłowym przemiennikiem częstotliwości, filtrem LC i silnikiem klatkowym przedstawiono na rysunku 4 i 5.

Układy napędowe są zasilane z niezziemionego układu zasilania typu IT, posiadające znaczące pasyżnicze pojemności doziemne muszą mieć sztucznie wytworzony obwód przepływu wysokoczęstotliwościowych prądów doziemnych wytwarzanych napięciem CM falownika. Na rysunku 4 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 falowniku przemiennika częstotliwości niezależnie od budowy przemiennika.

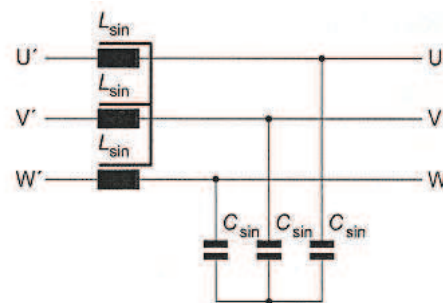
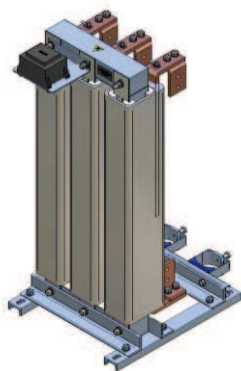
Wykorzystanie konfiguracji filtra pasożytniczych prądów doziemnych wg rysunku 5 jest możliwe, ale wymaga ingerencji w strukturę przemiennika częstotliwości.

Obie przedstawione konfiguracje mogą być wykorzystywane 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 uzziemionego punktu neutralnego uzwojenia wtórnego transformatora zasilania, zakłócając pracę ochronnych

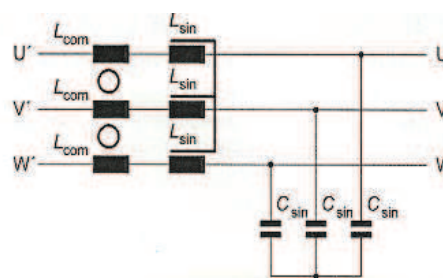
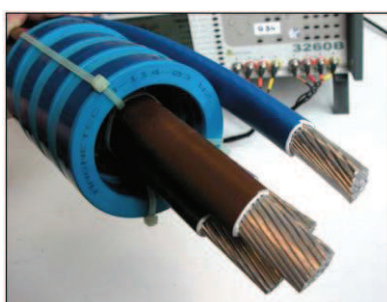
wyłączników różnicowoprądowych lub przekładników prądowych.

W niezziemionych układach zasilania IT przepływ wysokoczęstotliwościowych prądów doziemnych z filtra LC typu DM-CM do wejść zasilania przemiennika częstotliwości lub bezpośrednio do jego obwodu pośredniego napięcia stałego przez przewód ochronny PE (pominięcie dodatkowego połączenia  $C_N-Z_K$  – linia przerywana, rysunek 4 lub połączenia  $N'-Z_K$  rysunek 5), uniemożliwia pracę napędu przy wystąpieniu pojedynczego zwarcia doziemnego, tak po stronie zasilania przemiennika częstotliwości jak i silnika.

W sieciach izolowanych układ napędowy z rysunku 4 może być powszechnie wykorzystywany, gdyż umożliwia zamknięcie prądów zaburzających CM bez ingerowania w strukturę wewnętrzną przemiennika częstotliwości. Zaburzenia wysokoczęstotliwościowe według rysunku 4 i rysunku 5 zostają zamknięte w układzie: przemiennik częstotliwości-filtr LC i nie przepływają przez pozostałe elementy systemu zasilania napędu. Celem badań jest określenie skuteczności filtracji zaburzeń CM zastosowanych filtrów LC. Należy zwrócić uwagę, że przy nieobciążonym przemienniku częstotliwości może nastąpić niepożądany wzrost napięcia w jego obwodzie DC, dlatego przy stosowaniu filtracji napięcia zaburzeń wspólnych przemiennik częstotliwości powinien być obciążony.



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



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

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

Standardowy filtr zaburzeń typu DM zawiera 3-fazowy dławik  $3 \times L_{sin}$  oraz kondensatory  $3 \times C_{sin}$  włączone pomiędzy fazy. Ten typ filtra ma mały wpływ na zakłócenia typu CM. Przy doborze wartości elementów filtra powinna być spełniona zależność (2).

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

gdzie:

$f_n$  – częstotliwość nośna modulacji MSI falownika,  
 $f_r$  – częstotliwość rezonansowa 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 (50 Hz) i zwykle jest przyjmowany w przedziale 10–20. W praktyce inżynierskiej można przyjmować częstotliwości rezonansową filtra LC o wartości ok.  $f_r = 1$  kHz bez uwzględniania współczynnika korekcyjnego  $k$ .

Z zależności (1) wynika, że dla filtra trójfazowego o parametrach  $I_n = 16$  A/400 V o dławiku powodującym 5% spadek napięcia harmonicznej podstawowej (50 Hz) zasilania silnika oraz częstotliwości nośnej modulacji MSI falownika  $f_n = 4$  kHz, należy dobrać  $L_{sin}$  i  $C_{sin}$  o wartościach według zależności (3).

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

$$C_{sin} = k \cdot \frac{1}{\omega_{fn}^2 L_{sin}} = 10 \cdot \frac{1}{(2\pi \cdot 4kHz)^2 \cdot 4mH} = 4,0\mu F \quad (3)$$

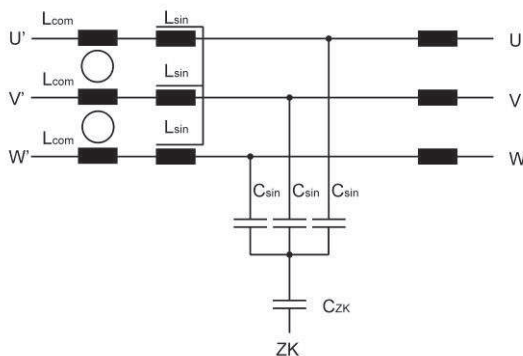
## 2.3. Dolnoprzepustowy filtr LC dla napięcia zaburzeń typu DM-CM z pierścieniami ferrytowymi

W filtrze zastosowano dodatkowe trzy indukcyjności  $3 \times L_{com}$ , które są nawinięte na jeden rdzeń magnetyczny (rys. 7). Pozwalają one na indukcyjne tłumienie prądu zaburzeń CM, głównie w paśmie częstotliwości radiowych ok. 150 kHz–30 MHz, gdzie impedancja dławika  $L_{com}$  jest większa od 1 kΩ [9], [22], [23], [24]. W rozwiązaniach przemysłowych stosuje się kilka pierścieni ferromagnetycznych (np. 4 pierścieniowe rdzenie magnesu neodymowego), przez które są przewleczone żyły fazowe kabla silnikowe-

go. Filtr LC z indukcyjnościami do tłumienia zaburzeń wspólnych przedstawiono na rys. 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.

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

Ten filtr dolnoprzepustowy dla zaburzeń typu DM-CM (rys. 8) posiada dodatkowy kondensator włączony pomiędzy kondensatory tłumienia zaburzeń CM oraz wejściowy filtr pojemnościowy (np.  $3 \times 2\mu\text{F}$ ) (rys. 4). Ogranicza on zakłócenia typu CM i 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 (rys. 5).

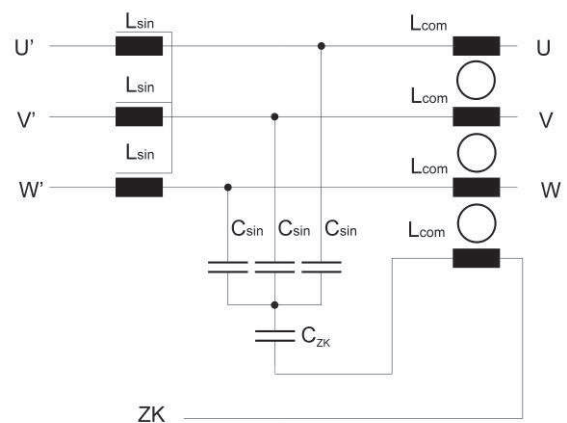


Rys. 8. Standardowy filtr LC typ DM stosowany do uzyskiwania sinusoidalnego napięcia międzyfazowego zasilania silnika z dodatkowymi indukcyjnościami  $3 \times L_{com}$  do tłumienia zaburzeń CM i pojemnością sprzęgającą  $C_{ZK}$

Eliminuje to konieczność stosowania trójfazowego pojemnościowego filtra na wejściach zasilania przemiennika częstotliwości, jak na rys. 4 [12], [13], [14], [15].

## 2.5. Dolnoprzepustowy filtr LC dla zaburzeń typu DM – CM z transformatorem tłumiącym

Transformatory tłumiące CM są to indukcyjności CM z czwartym uzwojeniem. Prąd CM przepływa z kondensatorów DM przez czwarte uzwojenie do obwodu DC lub do filtru wejściowego. Prąd przepływający przez czwartą cewkę indukuje w przeciwfazie napięcie CM do trzech pozostałych cewek, tak że suma zakłóceń typu CM w silniku jest równa 0 (rys. 9). Jest to zasada napięciowej redukcji zaburzeń [13], [14], [15]. Warto zauważyć, że czwarty przewód, przewodzący prądy zaburzeń CM, może mieć przekrój znacząco mniejszy od przekrojów fazowych kabli silnikowych i mieć więcej zwojów nawiniętych na pierścieniach ferrytowych transformatora zaburzeń CM.



Rys. 9. Standardowy filtr LC typ DM stosowany do uzyskiwania sinusoidalnego napięcia międzyfazowego zasilania silnika z dodatkowym transformatorem do tłumienia zaburzeń CM  $4 \times L_{com}$  i pojemnością sprzęgającą  $C_{ZK}$

## 3. REZULTATY BADAŃ

W badaniu użyto przemiennikowych układów napędowych przedstawionych na rys. 4 i rys. 5 zależnie od badanego filtra LC. Użyty był przemiennik częstotliwości o mocy 2,2 kW bez filtrów wewnętrznych. Częstotliwość przełączania wynosiła  $f_n = 4,5$  kHz przy harmonicznym podstawowym międzyfazowego napięcia wyjściowego falownika 400 V/50 Hz (współczynnik głębokości modulacji  $M = 1$ ). Użyty



Rys.10. 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

silnik o mocy 2,2 kW nie miał izolowanych łożysk na wale, a użyty w badaniach filtr LC typ DM jest filtrem standardowym o  $I_N = 16$  A dla częstotliwości  $f_n = 4$  kHz-6 kHz. Zmierzone pasożytnicze pojemności doziemne na wejściach zasilania przemiennika częstotliwości wynosiły 4-6 nF. Sieć zasilającą typu IT zbudowano z zastosowaniem transformatora separującego 10 kVA.

Wejściowy filtr pojemnościowy jak na rys. 4 został wykonany poprzez włączenie kondensatorów  $3 \times 1 \mu\text{F}$  między napięcia fazowe transformatora separującego a punkt gwiazdowy filtra był dołączany do przewodu ochronnego PE instalacji napędu z przemiennikiem częstotliwości (rys. 10a) lub do przewodu  $C_N$ - $Z_K$  lub  $N^*$ - $Z_K$  (rys. 4 i rys. 5).

Do zasilania użyto kabel silnikowy nieekranowany  $4 \times 4$  mm<sup>2</sup> o długości 10 mb. Pojemności międzyprzewodowe i doziemne na zaciskach silnika wynosiły 4-6 nF.

Dla określenia wpływu ekranowanego kabla silnikowego o dużym przekroju użyto dodatkowych kondensatorów dołączonych do zacisków silnika o wartościach:  $3 \times 19$  nF – pojemności międzyprzewodowe,  $3 \times 32$  nF – pojemności doziemne. Odpowiadają one parametrom ekranowanego kabla silnikowego  $4 \times 50$  mm<sup>2</sup> [25], rys. 10b.

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

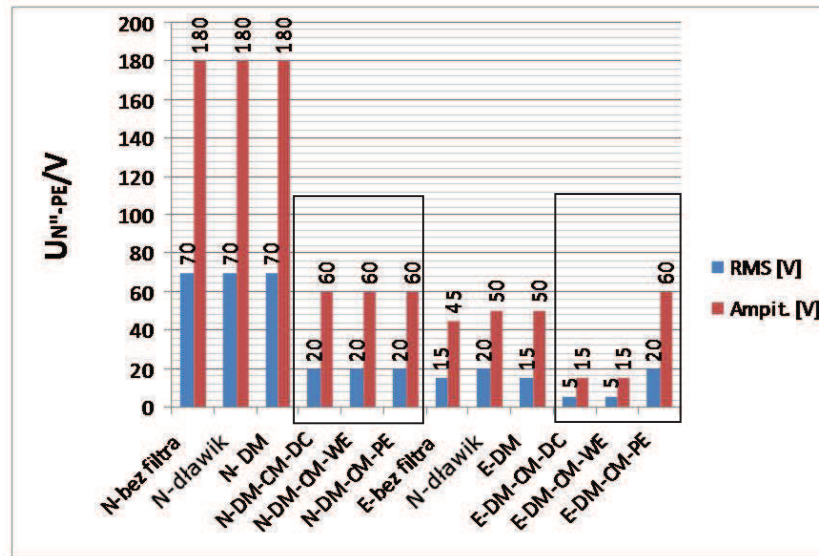
- 1 – bez filtra,
- 2 – dławik silnikowy (rys. 6 – filtr LC typ DM bez kondensatorów),
- 3 – filtr LC typ DM (rys. 6),
- 4 – LC DM-CM-DC (rys. 5 i rys. 8 bez dławika CM,  $C_{ZK}=10 \mu\text{F}$ ),
- 5 – filtr LC DM-CM-WE (rys. 4 i rys. 8 bez dławika CM,  $C_{ZK}=10 \mu\text{F}$ ),

- 6 – LC DM-CM-PE (pojemnościowy filtr wejściowy i filtr silnikowy LC zwarty z przewodem PE i rys. 8 – bez dławika CM),

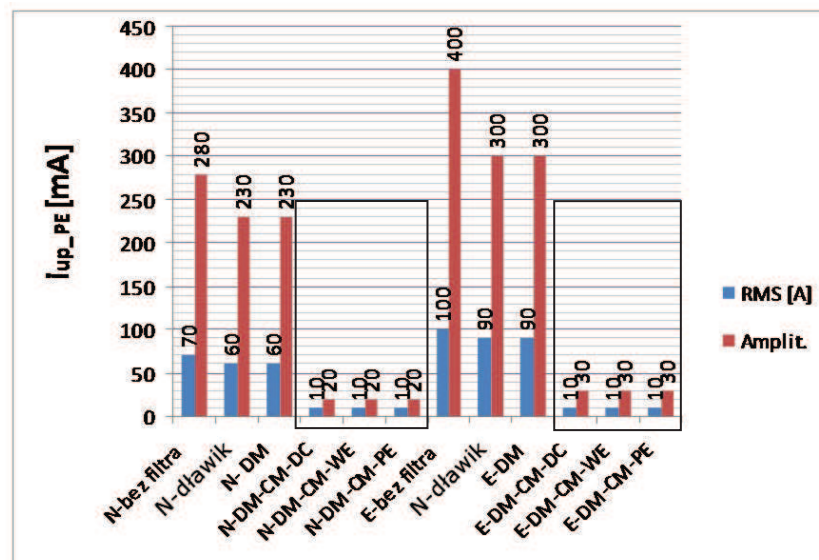
### 3.1. Napięcie względem ziemi punktu neutralnego uzwojeń stojana silnika i prąd doziemny w przewodzie ochronnym PE

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 (rys. 11). Same dławiki silnikowe nie wpływają na zmniejszenie napięcia między uziemionym korpusem silnika i punktem neutralnym uzwojeń stojana, co wpływa negatywnie na pracę 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. Najkorzystniejsze właściwości mają filtry LC typ DM-CM wg konfiguracji z rysunku 4 i rysunku 5, gdyż zapewniają drogę przepływu prądów pasożytniczych poza przewodem ochronnym PE, a tym samym napęd może pracować przy wystąpieniu pojedynczego zwarcia doziemnego. Filtr LC typu DM-CM (DM-CM-PE) posiadający połączenie z przewodem ochronnym PE przewodzi w części tego przewodu prądy filtra i uniemożliwia pracę napędu przy zwarciu doziemnym (rys. 12).



Rys. 11. Wykres zależności napięcia między punktem neutralnym uzwojeń stojana silnika i uziemioną obudową  $U_{N'-PE}$  dla nieekranowanego (N) i ekranowanego (E) kabla silnikowego



Rys. 12. Wysokoczęstotliwościowe prądy zaburzeń w przewodzie ochronnym PE w części między przemiennikiem częstotliwości a transformatorem dla nieekranowanego (N) i ekranowanego (E) kabla silnikowego

### 3.2. Napięcie fazowe na zaciskach silnika

Doziemne pojemności pasożytnicze powodują powstawanie wysokoczęstotliwościowych prądów w instalacji ochronnej napędu z przemiennikiem częstotliwości. Duże pojemności doziemne silnikowych kabli ekranowanych są przyczyną, że duża część napięcia zaburzeń wspólnych CMV odkłada się na relatywnie mniejszych pojemnościach doziemnych po stronie zasilania przemiennika częstotliwości. Powoduje to przesuwanie się względem ziemi nieuziemionego punktu neutralnego uzwojenia wtórnego transformatora i od napięcia fazowego transformatora odejmuje się napię-

cie zaburzeń wspólnych, co zwiększa fazowe napięcie 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.  $3 \times 690$  V).

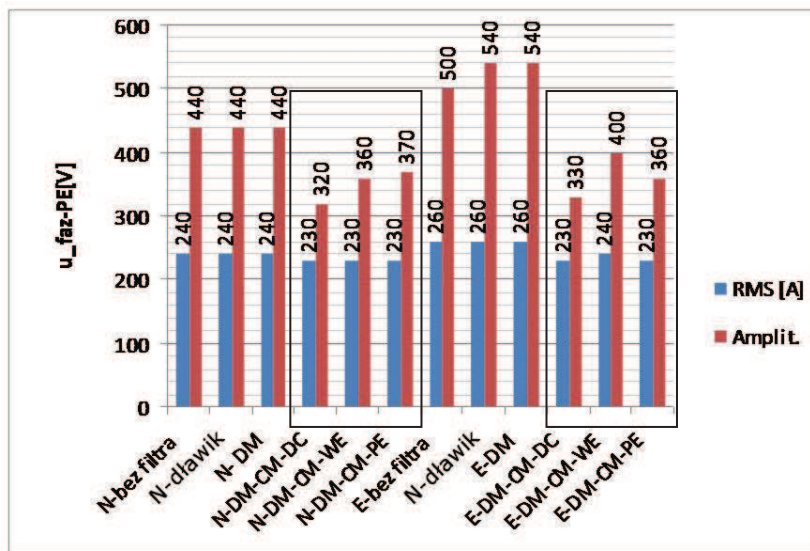
Badane pasywne filtry LC typu DM-CM skutecznie ograniczają wartości chwilowe fazowych napięć zasilania przemiennika częstotliwości. Ich stosowanie wydaje się być szczególnie uzasadnione w napędach większych mocy z ekranowanymi kablami silnikowymi (rys. 13).



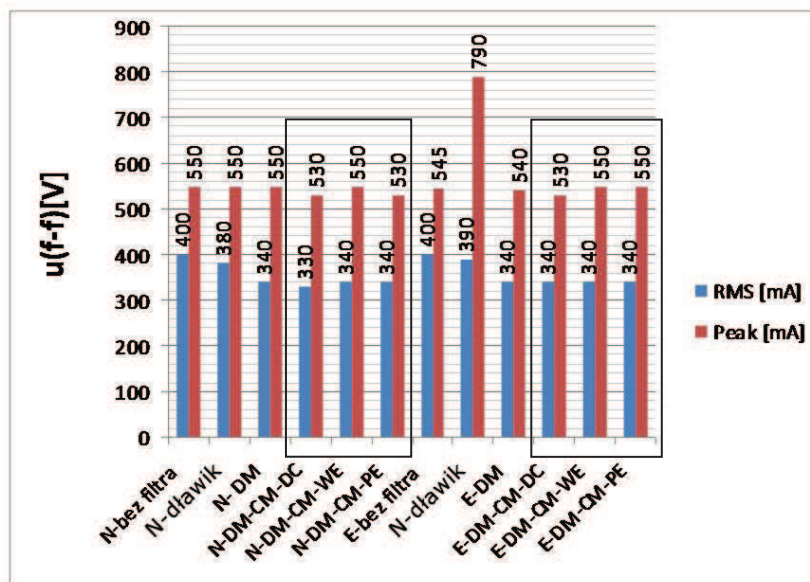
### 3.3. Napięcie międzyfazowe na zaciskach silnika

Stwierdzono, że istotnym mankamentem stosowania filtrów pasywnych napięcia zaburzeń wspólnych CM jest obniżenie międzyfazowego napięcia zasilania silnika. Przy nominalnym obciążeniu silnika na-

stępuje obniżenie jego napięcia zasilania, o ok. 15% zarówno przy stosowaniu kabli silnikowych nieekranowanych, jak i ekranowanych. Aby zminimalizować skutki pracy filtra LC należy dokonać powiększenia tego napięcia poprzez zastosowanie przemodelowania w algorytmie modulacji falownika MSI (rys. 14).



Rys. 13. Wykres zależności fazowego napięcia zasilania przemiennika częstotliwości w napędzie dla nieekranowanego (N) i ekranowanego (E) kabla silnikowego



Rys. 14. Wykres zależności prądu upływu doziemnego silnika  $i_{up\_sil}$  (pomiar w przewodzie ochronnym PE między uziemieniem przemiennika częstotliwości i uziemieniem badanego filtra LC) dla nieekranowanego (N) i ekranowanego (E) kabla silnikowego

### 4. WNIOSKI

W artykule porównano pasywne filtry silnikowe LC do redukcji zaburzeń typu DM i CM na wyjściach napięciowych falownika z modulacją PWM.

Filtr pasywny LC typ DM-CM włączony w układzie z rys. 4 lub rys. 5 okazał się najlepszym rozwiązaniem i stosowanie tych konfiguracji umożliwia 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.

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.

#### 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. Hupponen 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. Hupponen 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 umrichtergespeisten 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, IPEMC, 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. CIMR-G7C Varispeed G7 Data sheet OMRON, 2011.
22. 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.
23. MAGNETIC Magnet-Technologie, COOL BLUE, PB-CB, Magnetic GmbH, 2009.
24. VAC Vacuumschmelze – specification – Item Nr T60405-S6123-X163, 2011.
25. HELUKABEL, katalog „Kable i przewody 2009/2010”, www.helukabel.pl – 2011.

Recenzent: dr inż. Marcin Habrych

#### EFFICIENCY OF THE IMPAIRMENT OF GROUND CURRENT DISTURBANCES OF LC ENGINE FILTERS IN THE DRIVES WITH VOLTAGE INVERTERS SUPPLIED FROM AN IT NETWORK

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 motor phase-ground and phase-phase voltage. Examinations were made for unscreened and screened motor cables.

#### ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЛУШЕНИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ В ЗЕМЛЕ ФИЛЬТРОВ ДВИГАТЕЛЯ LC В ПРИВОДАХ С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ НАПРЯЖЕНИЙ, ПИТАЕМЫМИ ОТ СЕТИ IT

В докладе содержится сравнение некоторых характеристик двигательных пассивных фильтров LC, ограничивающих токи возврата через землю кабелей двигателей и двигателей, в приводах с преобразователями частоты. Выполнены исследования фильтров LC, используемых в приводах, питаемых от незаземлённых сетей типа IT. В исследованиях, оценивающих эффективность фильтрации напряжения совместных возмущений учтено такие критерия, как: напряжение по отношению к земле нейтрального пункта обмоток статора двигателя и ток возврата через землю в защитном проводе PE, а также фазовое и межфазовое напряжение на зажимах двигателя.