

Piotr Zientek, Roman Niestrój
Politechnika Śląska, Gliwice

METODY ELIMINACJI PRĄDÓW ŁOŻYSKOWYCH I PRĄDU UZIOMU W UKŁADACH NAPĘDOWYCH ZASILANYCH Z FALOWNIKÓW PWM

THE METHOD OF ELIMINATION BEARING CURRENTS AND LEAKAGE CURRENT IN PWM INVERTER DRIVES

Abstract: In the paper are discussed different kinds of parasitic phenomena occurring in PWM inverter driven induction motors. In the article describes methods for limiting bearing currents and common-mode current in PWM drives. The paper also presents results of experimental researches. Conclusions drawn from laboratory researches are presented in chapter 7.

1. Wstęp

Jednym z podstawowych źródeł powstawania zakłóceń w układach napędowych są obwody z tranzystorami IGBT oraz MOSFET. Wynikają one głównie z dużych stromości narastania napięć oraz prądów i mogą być generowane zarówno do obwodów wejściowych jak i wyjściowych przemiennika częstotliwości. Występowanie zakłóceń w układach napędowych wiąże się z zastosowaniem odkształconych napięć zasilających silnik. Przy niesymetrycznym zasilaniu dąży się do ograniczenia poziomu zaburzeń generowanych przez przemiennik częstotliwości, poprzez odpowiednie ekranowanie, uziemianie, separację galwaniczną oraz stosowanie odpowiednich filtrów. Jednym ze sposobów ograniczania zaburzeń emitowanych z obwodów przemiennika częstotliwości jest stosowanie odpowiedniego algorytmu przełączania łączników energoelektronicznych.

Nieuwzględnienie powyższej problematyki na etapie projektowania całego układu napędowego prowadzi do powstania szeregu nie zamierzonych zjawisk pasożytniczych [1, 2, 3, 4]. Zalicza się do nich:

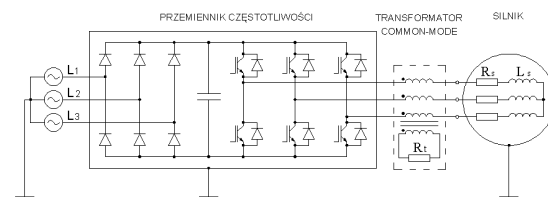
- napięcie niezrównoważenia,
- napięcia na korpusach izolowanych silników,
- napięcia i prądy wałowe,
- napięcia i prądy łożyskowe,
- prądy doziemne w silnikach uziemionych,
- spadek sprawności silnika,
- wzrost temperatury uzwojeń,
- emisja zakłóceń elektromagnetycznych,
- prądy ekranowe w kablach ekranowanych,

- powstawanie przepięć na zaciskach silnika, w układach z długim kablem silnikowym,
- błędne działanie zabezpieczeń upływnościowych.

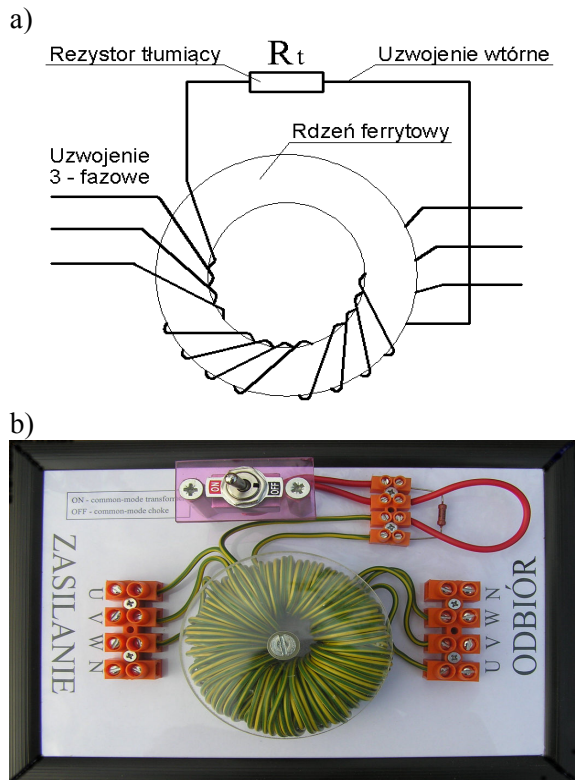
W związku z bardzo szybkim rozwojem techniki należy szukać coraz to nowszych metod przeciwdziałania powstającym zjawiskom pasożytniczym, nie tylko zmniejszając poziom zakłóceń poprzez zastosowanie odpowiednich filtrów, ale także eliminując przyczyny ich powstawania na etapie projektowania układu napędowego.

2. Układ zasilania z transformatorem zaburzeń wspólnych

Jedną z metod skutecznie ograniczających wartość prądu płynącego w przewodzie uziomowym silnika jest zastosowanie w układzie napędowym z przemiennikiem częstotliwości transformatora zaburzeń wspólnych (rys. 1, 2). Transformator taki składa się z rdzenia toroidalnego, na którym nawinięte jest uzwojenie. Schemat wykonania i realizację praktyczną takiego filtra przedstawiono na rysunku 2.

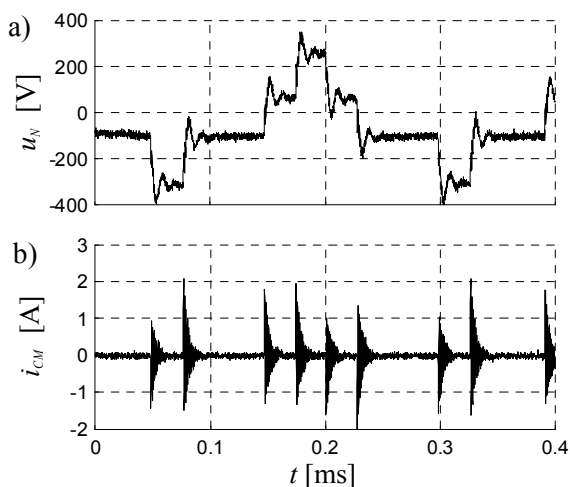


Rys. 1. Układ zasilania z transformatorem zaburzeń wspólnych

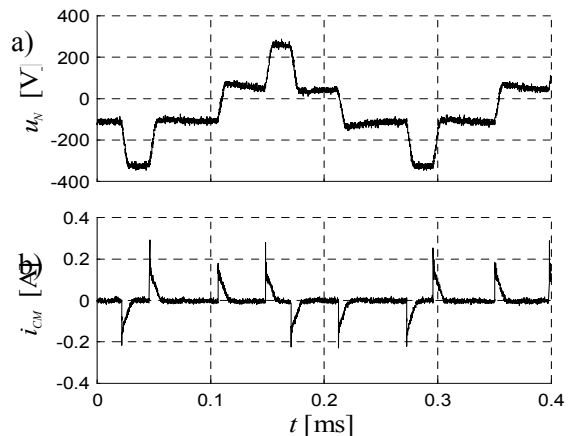


Rys. 2. Transformator zaburzeń wspólnych: a) schemat wykonania filtra, b) realizacja praktyczna

W celu określenia przydatności takiego filtra do tłumienia prądu w przewodach uziomowych wykonano pomiary prądu uziomu w układzie zasilania bez i z transformatorem zaburzeń wspólnych. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 3 i 4. Dodatkowo z przebiegów tych wybrano największe impulsy prądu, i w tabeli 1 podano wartość maksymalną, skuteczną i średnią tych impulsów.



Rys. 3. Przebieg: a) napięcia niezrównoważenia, b) prądu zaburzeń wspólnych w układzie napędowym bez filtrów



Rys. 4. Przebieg a) napięcia niezrównoważenia, b) prądu zaburzeń wspólnych w układzie napędowym z transformatorem zaburzeń wspólnych

Tabela 1. Wartość prądu w przewodzie uziomowym silnika

	$I_{CM(max)}$ [mA]	$I_{CM(RMS)}$ [mA]	$I_{CM(Mean)}$ [mA]
Układ zasil. bez filtru	2018	624	105
Układ zasil. z transf. zaburzeń wspólnych	295	35,2	105

Na podstawie analizy zarejestrowanych przebiegów oraz wyników zamieszczonych w tabeli 1 można stwierdzić, że transformator zaburzeń wspólnych skutecznie tłumi nie tylko wartość maksymalną, ale także średnią i skuteczną prądu uziomu, co jest znaczącą jego zaletą.

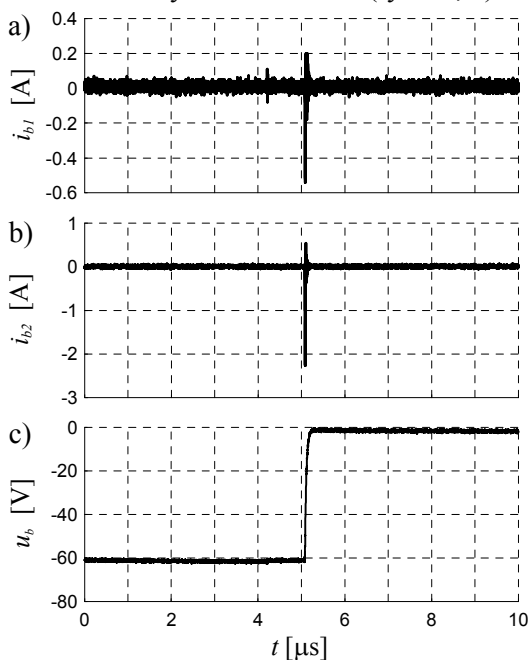
3. Zastosowanie rdzeni Cool Blue

Jednym ze sposobów eliminacji zakłóceń w układach napędowych z falownikami PWM jest stosowanie toroidalnych rdzeni Cool Blue (rys. 5). Rdzenie te wykonane są z materiału nanokrystalicznego Nanoperm.



Rys. 5. Toroidalne nanokrystaliczne rdzenie Cool Blue

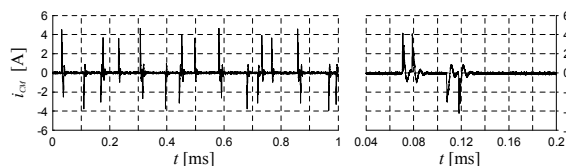
W publikowanych materiałach bardzo często pojawia się informacja, że rdzenie te używane są do ograniczania niszczących silniki prądy łożyskowe, pojawiające się w układach sterowania wykorzystujących wysokie częstotliwości przełączania zaworów. Niewłaściwe jest stwierdzenie, że rdzenie te eliminują niszczące łożyska prądy łożyskowe. Wynika to z błędnego założenia, że prądy te po przerwaniu filmu olejowego przepływają przez łożyska silnika i obciążenie do uziomu. Z przeprowadzonych badań wynika, że niszczące łożyska wyładowcze prądy łożyskowe zamykają się wewnątrz silnika, w obwodzie złożonym z wału, obu łożysk, kadłuba oraz pojemności wewnętrznych silnika. Przeprowadzone badania laboratoryjne wykazały, że założenie rdzeni Cool Blue na przewody zasilające silnik nie eliminuje wyładowczych prądów łożyskowych powodujących uszkodzenia łożysk. Prądy te nadal występują i to o dość dużych wartościach (rys. 6a, b).



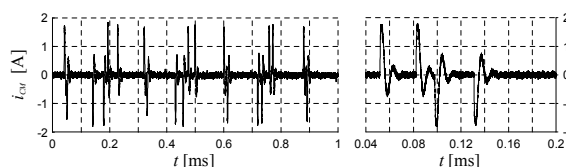
Rys. 6. Przebieg: a) prądu w łożysku strony napędowej, b) prądu w łożysku strony przeciwnapędowej, c) napięcia łożyskowego, po zastosowaniu rdzeni nanokrystalicznych Cool Blue

Rdzenie toroidalne Cool Blue mają jednak inną zaletę. Tłumią one asymetryczne prądy generowane przez pojemności wewnętrzne (często zwane jako pasożytnicze) silnika i kabla zasilającego, płynące w przewodzie uziomowym silnika. Rdzenie te pełnią funkcję dławików skompensowanych. W celu osiągnięcia skutecznego ograniczenia prądów pasożytniczych należy stosować odpowiednią ilość rdzeni umiesz-

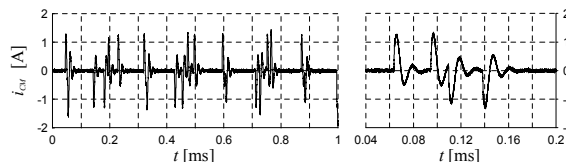
czając je obok siebie. Wyniki badań laboratoryjnych pomiaru prądu uziomu bez dławików i przy różnej ilości rdzeni przedstawiono na rysunkach 7, 8, 9.



Rys. 7. Przebieg prądu uziomu bez dławików i pierścieni



Rys. 8. Przebieg prądu uziomu po zastosowaniu 4 pierścieni M-114-03 W4



Rys. 9. Przebieg prądu uziomu po zastosowaniu 4 pierścieni M-114-03 W4 i 4 pierścieni M-115-03 W4

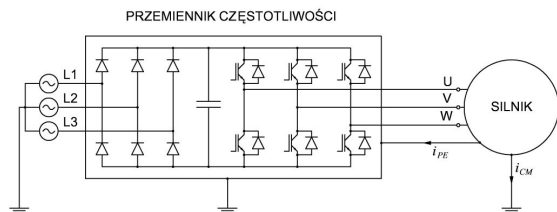
Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych można jednoznacznie stwierdzić, że rdzenie Cool Blue nie eliminują wyładowczych prądów łożyskowych. Odpowiedni jednak dobór ilości tych pierścieni w zależności od budowy układu napędowego powoduje, że możemy w bardzo dużym stopniu zmniejszyć prąd w przewodzie uziomowym silnika.

4. Zastosowanie kabli Topflex EMV 3 Plus do zasilania silników

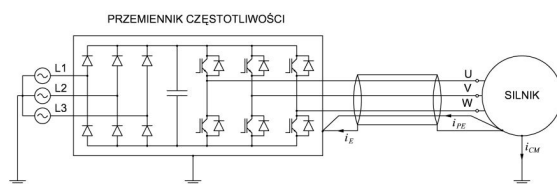
Tradycyjne układy zasilania z przemiennikami częstotliwości wykorzystują kable zasilające 4 przewodowe bez ekranu (rys. 10). Tak przyjęte rozwiązanie powoduje emisję zakłóceń z przewodów zasilających silnik. W celu ich ograniczenia należy stosować odpowiednie środki zaradcze. Jednym z nich jest zastosowanie odpowiednich kabli ekranowanych o obniżonej pojemności typu TOPFLEX EMV 3 PLUS. Schemat układu napędowego z wykorzystaniem tego typu kabli przedstawiono na rysunku 11. W publikowanych materiałach podawana jest informacja, że kable te skutecznie eliminują bardzo duże wartości prądów łożyskowych (o amplitudzie ponad 10A) związanych z prze-

łączeniem zaworów falownika PWM. Informacja co do wartości tych prądów wynika z mylnie przyjętego założenia, że cały prąd ekranu kabla przepływa przez kadłub i łożyska silnika do przewodu uziomowego, skąd płynie z powrotem do falownika.

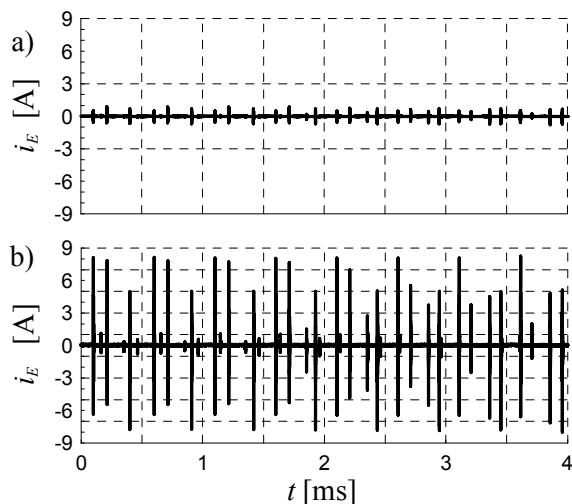
W celu określenia kierunku przepływu prądu ekranowego dokonano jego pomiaru jednocześnie przy falowniku i przy silniku. Wyniki pomiaru przedstawiono na rysunku 12.



Rys. 10. Układ napędowy silnika z przemiennikiem częstotliwości przy zastosowaniu kabla 4 przewodowego bez ekranu



Rys. 11. Układ napędowy silnika z przemiennikiem częstotliwości i kablem ekranowanym TOPFLEX EMV 3 PLUS



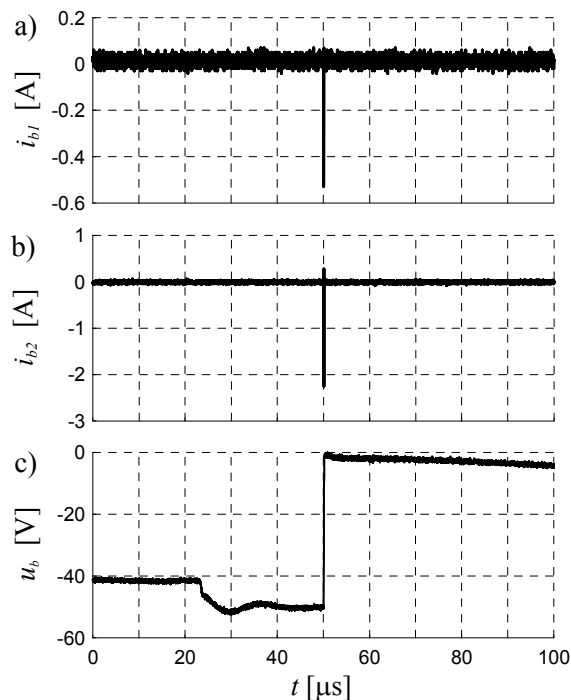
Rys. 12. Przebieg prądu ekranowego: a) mierzony przy silniku, b) mierzony przy falowniku

Od strony falownika prąd ekranowy przyjmuje dużo większe wartości niż przy silniku. Spowodowane to jest dodawaniem się do prądu ekranowego prądu przepływającego przez pojemności pomiędzy przewodami fazowymi, a ekranem. Znacznie większa wartość prądu ekranowego od strony falownika wskazuje, że

prąd ten płynie od silnika do falownika. Błędne więc jest stwierdzenie, jakoby prąd ekranowy przepływał przez łożyska silnika.

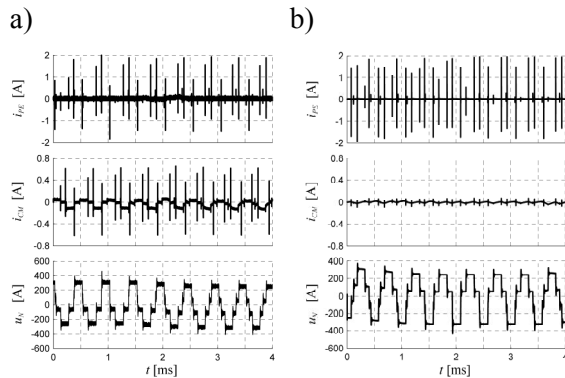
W celu określenia skuteczności ochrony łożysk po zastosowaniu kabli TOPFLEX EMV 3 PLUS konieczne jest określenie, jaki rodzaj prądów łożyskowych przepływa przez łożyska silnika. Na podstawie wcześniej przeprowadzonych badań można stwierdzić, że jedynymi niebezpiecznymi dla łożysk są wyładowcze prądy łożyskowe. Prądy te osiągają wartości znacznie większe niż prądy łożyskowe wynikające z przełączania zaworów falownika.

Z przeprowadzonych badań laboratoryjnych wynika, że kable ekranowane TOPFLEX EMV 3 PLUS nie eliminują wyładowczych prądów łożyskowych. Prądy te nadal występują stwarzając poważne zagrożenia dla łożysk (rys. 13).

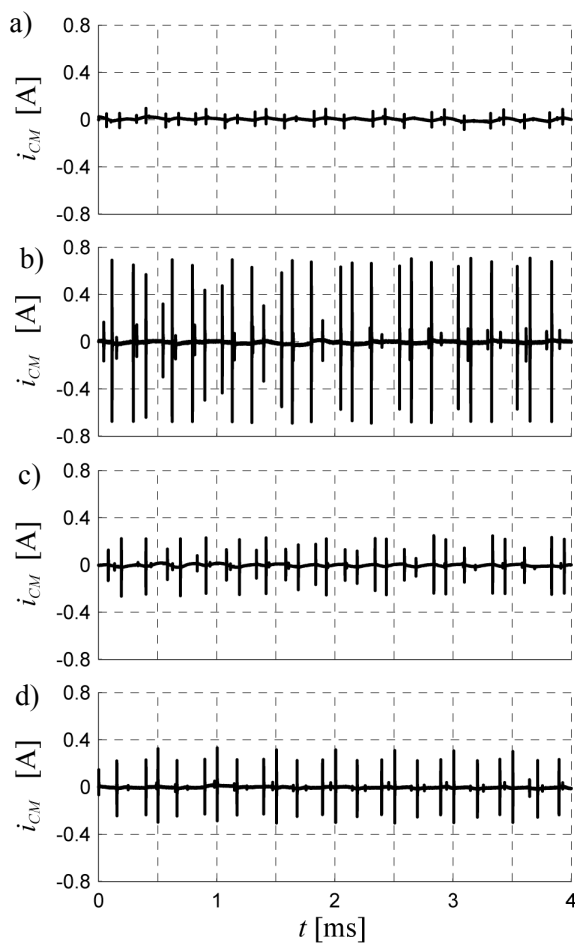


Rys. 13. Przebieg: a) prądu w łożysku strony napędowej, b) prądu w łożysku strony przeciwnapędowej, c) napięcia łożyskowego, po zastosowaniu kabli TOPFLEX EMV 3 PLUS

Zastosowanie kabli ekranowanych o obniżonej pojemności typu TOPFLEX EMV 3 PLUS ma jednak bardzo dużą zaletę. Powodują one prawie całkowite ograniczenie prądu i_{CM} płynącego w przewodzie uziomowym silnika (rys. 14b), w porównaniu ze zwykłymi kablami (rys. 14a).



Rys. 14. Przebiegi: a) przy zastosowaniu zwykłych (4 przewodowych) kabli zasilających silnik, b) przy zastosowaniu kabli TOPFLEX EMV 3 PLUS



Rys. 15. Przebieg prądu w przewodzie uziomowym silnika przy zastosowaniu kabli TOPFLEX EMV 3 PLUS: a) przy obustronnym połączeniu ekranu kabla z masą, b) przy odłączonym ekranie kabla od falownika, c) przy odłączonym ekranie kabla od silnika, d) przy braku połączeń ekranu kabla z obu stron

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że sama konstrukcja kabla nie wystarcza do uzyskania zadowalającego efektu

minimalizacji emisji zakłóceń. Aby przewód spełniał swe zadanie należy zapewnić odpowiednie połączenie ekranu kabla z masą na obu jego końcach, w celu umożliwienia przepływu prądu generowanego przez zjawiska polowe i pojemności pasozytne. Przepływ taki określany jest pojęciem prądu ekranowego, który pomniejsza emisję zakłóceń elektromagnetycznych na zewnątrz powierzchni wyznaczonej przez ekran. W celu określenia jak bardzo ważną funkcję pełni ekran wykonano specjalistyczne badania laboratoryjne. Badania polegały na pomiarze prądu i_{CM} w przewodzie uziomowym silnika przy różnych kombinacjach połączeń przewodu ekranowego na końcach kabla zasilającego silnik. Wyniki badań laboratoryjnych przedstawiono na rysunku 15.

Na podstawie analizy uzyskanych przebiegów można jednoznacznie stwierdzić, że aby ekran spełniał swoją funkcję należy go uziemić na obu końcach kabla. Najlepsze rozwiązanie stanowi tutaj uziemienie w zakresie pełnego obwodu powierzchni ekranu kabla. Połączenie takie można zrealizować dzięki zastosowaniu specjalnych dławików o różnych konstrukcjach, w zależności od zastosowanych przekroji kabli (rys. 16). Umożliwia to wraz z połączeniem wyrównawczym swobodny przepływ prądów pasozytnych redukujących emisję zakłóceń.

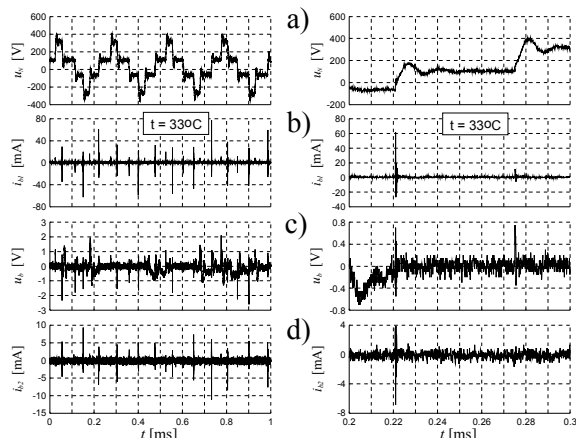


Rys. 16. Różne rozwiązania konstrukcyjne połączeń ekranu kabla z masą

5. Zastosowanie smaru elektroprzewodzącego w łożyskach

Eliminację prądów łożyskowych EDM można uzyskać przez zastosowanie smaru elektroprzewodzącego w łożyskach silnika. Do badań laboratoryjnych wykorzystano smar elektroprzewodzący GRAISSE A L'ARGENT⁶³⁴ firmy ORAPI. Jest to smar srebrny na bazie

proszku srebra, który poprawia przewodzenie prądu, zapobiega iskrzeniu i łukom elektrycznym. Temperatura pracy smaru zawiera się w granicach od -20°C do $+250^{\circ}\text{C}$. Smar ten posiada dużo mniejszą rezystywność w porównaniu ze smarami olejowymi. Zapewnia on drogę dla przepływu prądu przez łożysko o dużo mniejszej impedancji, nie dopuszczając do osiągnięcia na łożysku krytycznego napięcia przebicia. Może się jednak okazać, że obecność cząstek metalicznych w smarze powoduje szybsze ścieranie się powierzchni tocznych, co w konsekwencji przyspiesza mechaniczne zużycie łożyska. Wyniki badań laboratoryjnych prądów łożyskowych po zastosowaniu wyżej wymienionego smaru przedstawiono na rysunku 17. W trakcie pomiarów nie zarejestrowano i nie zauważono występowania wyładowczych prądów łożyskowych EDM. Płynęły jedynie prądy łożyskowe wynikające z przełączania zaworów falownika. Nie stwarzają one jednak zagrożenia dla mechanicznej trwałości łożysk.



Rys. 17. Przebieg: a) napięcia niezrównoważenia, b) prądu w łożysku strony napędowej DE, c) napięcia na łożysku, d) prądu w łożysku strony przeciwnapędowej NDE

6. Zastosowanie pierścienia uziemiającego wał silnika AEGIS SGR

Jednym ze sposobów eliminacji wyładowczych prądów łożyskowych EDM jest uziemienie wału silnika poprzez szczotkę. Tę samą funkcję spełniają pierścienie uziemiające wał typu AEGIS SGR (Shaft Grounding Ring), składające się z pierścienia metalowego, w którym osadzone są małe szczotki z mikrowłókien przewodzących wykonanych z grafitu (rys. 18). Pierścień uziemiający osadzony jest na wale silnika i przymocowany do pokrywy silnika za pomocą trzech specjalnych uchwytych (rys. 19).

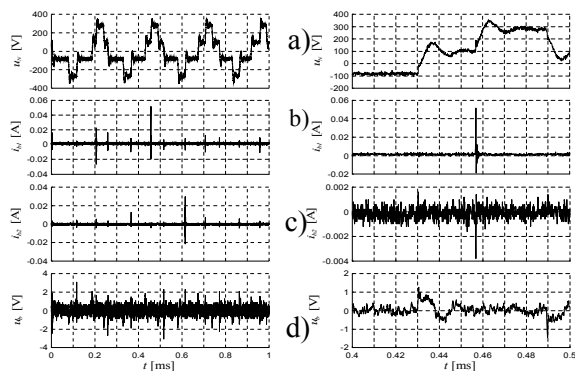


Rys. 18. Pierścień uziemiający wał AEGIS SGR, widok od strony montażu



Rys. 19. Silnik indukcyjny typu SZJe 24a o mocy 1,5 kW z zamontowanym pierścieniem

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że zastosowanie pierścienia uziemiającego wał znacznie ogranicza powstawanie napięcia na łożysku, a tym samym eliminuje powstawanie wyładowczych prądów łożyskowych EDM (rys. 20). Występują jeszcze nieliczne impulsy prądu w łożyskach o bardzo małej wartości (rys. 20b, c), ale nie stanowią one zagrożenia dla łożysk. Impulsy te powstają w momencie przełączania zaworów falownika, a zastosowanie pierścieni AEGIS nie wpływa na ich eliminację. Są to zatem prądy łożyskowe wynikające z przełączania zaworów falownika, a nie wyładowcze prądy łożyskowe EDM.

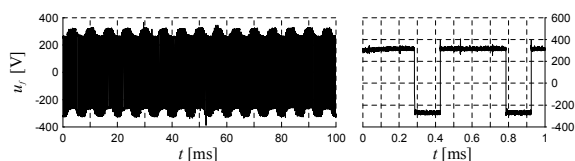


Rys. 20. Przebieg: a) napięcia nierównowagi, b) prądu w łożysku strony napędowej DE, c) prądu w łożysku strony przeciwnapędowej NDE, d) napięcia na łożysku silnika, w układzie z pierścieniem AEGIS SGR w silniku indukcyjnym typu SZJe 24a o mocy 1,5 kW

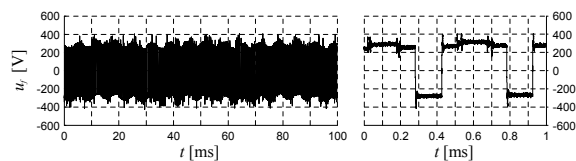
Pierścienie AEGIS SGR znacząco eliminują powstawanie wyładowczych prądów łożyskowych EDM, i można je z powodzeniem stosować jako środek zastępczy zamiast dotychczas stosowanych szczotek uziemiających wał.

7. Zastosowanie filtrów zasilających silnik

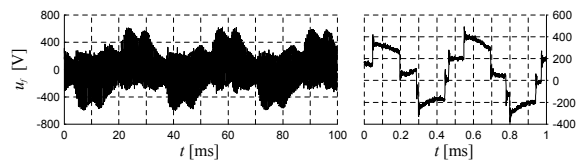
W układach zasilania z przemiennikami częstotliwości w zależności od przyjętej struktury i użytej techniki instalacyjnej, może wystąpić wiele niekorzystnych zjawisk mających ogromny wpływ na niezawodność pracy całego układu napędowego. Jedną z metod poprawy pracy silników indukcyjnych jest zastosowanie odpowiednich dławików lub filtrów pomiędzy falownikiem, a silnikiem. Umieszcza się je bezpośrednio za falownikiem w szafie zasilającej. Ich dobór jest uzależniony od wielu czynników. W ogólnym przypadku zależy od budowy falownika i rodzaju zastosowanych zaworów, częstotliwości sterowania zaworami oraz długości i rodzaju zastosowanych kabli zasilających. W zależności od rodzaju zastosowanych filtrów zmianie ulega kształt napięcia fazowego na zaciskach silnika (rys. 21 - 24), w porównaniu z wyjściowym napięciem fazowym falownika (rys. 25). Ograniczeniu ulegają też stromości poszczególnych impulsów napięcia zasilania silnika (rys. 26).



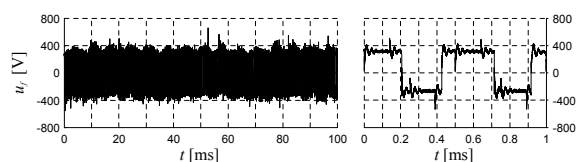
Rys. 21. Przebieg napięcia fazowego na zaciskach silnika w układzie zasilania bez filtrów



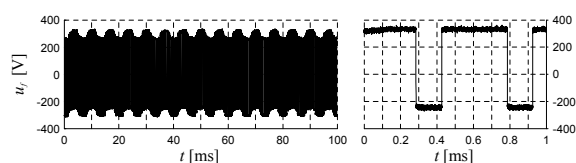
Rys. 22. Przebieg napięcia fazowego na zaciskach silnika po zastosowaniu dławika silnikowego typu CNW 854/8



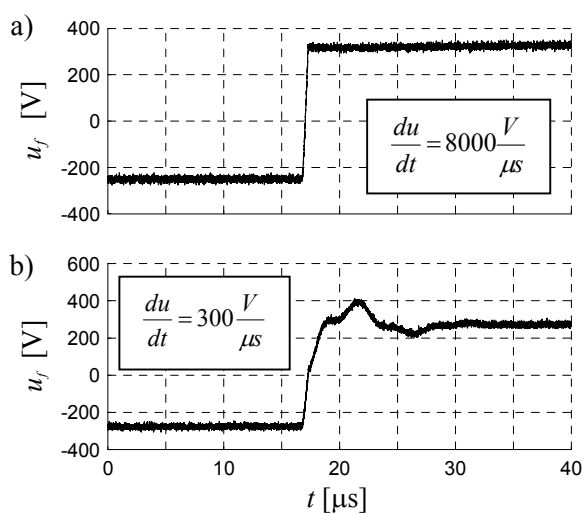
Rys. 23. Przebieg napięcia fazowego na zaciskach silnika po zastosowaniu filtra sinusoidalnego typu CNW 933/4



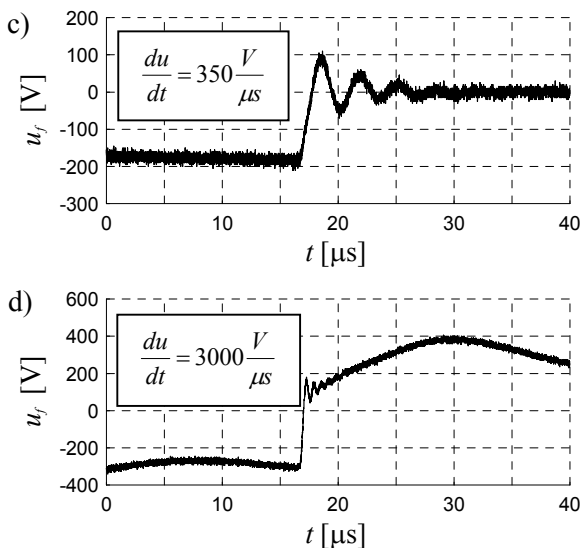
Rys. 24. Przebieg napięcia fazowego na zaciskach silnika po zastosowaniu filtra \$du/dt\$ typu CNW 811/6



Rys. 25. Przebieg napięcia fazowego na wyjściu falownika

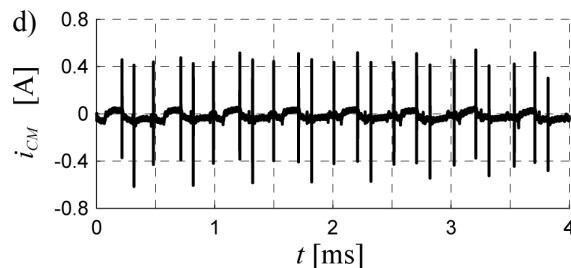
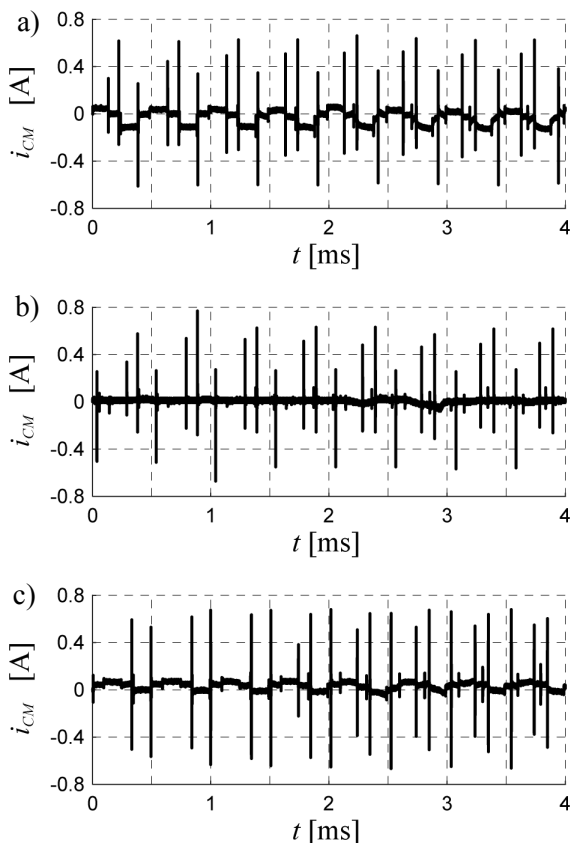


Rys. 26. Przebieg napięcia fazowego na wyjściu falownika z podanymi stromościami



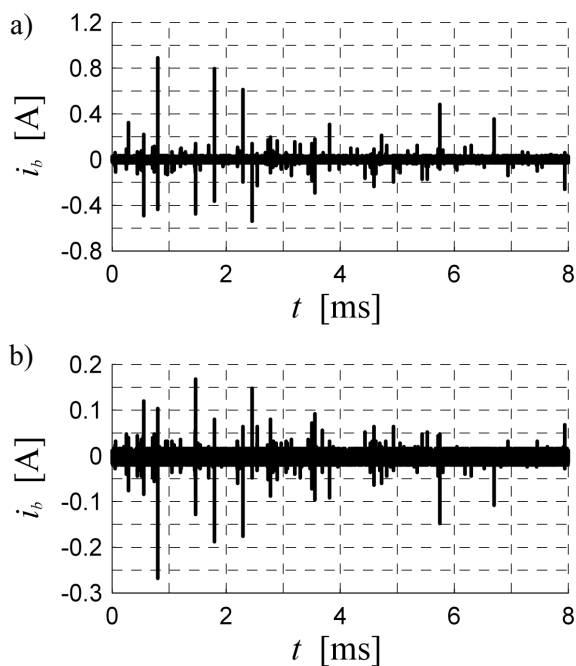
Rys. 26. Pojedynczy impuls napięcia fazowego: a) na wyjściu falownika, oraz na zaciskach silnika po zastosowaniu: b) dławika silnikowego, c) filtra sinusoidalnego, d) filtra du/dt

W zależności od rodzaju zastosowanego filtra, zauważalne są minimalne różnice w wartości prądu w przewodzie uziomowym silnika (rys. 27). Największe zmniejszenie prądu uziomowego uzyskujemy po zastosowaniu filtra du/dt (rys. 27d).

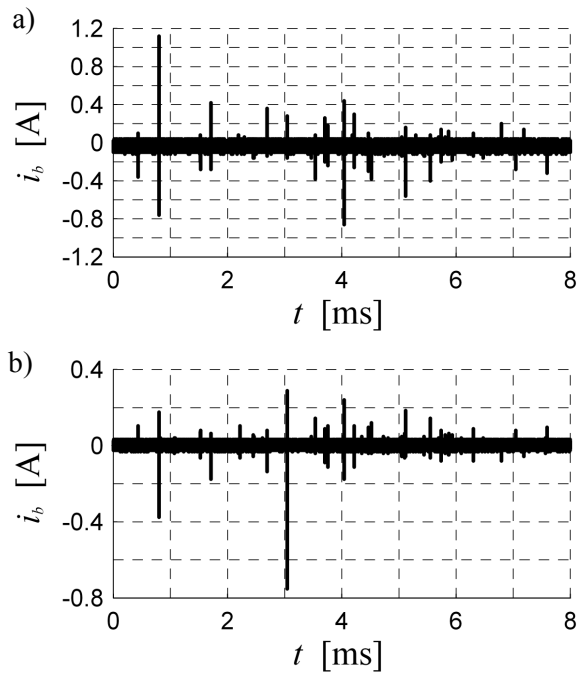


Rys. 27. Przebieg prądu w przewodzie uziomowym, w przypadku układu zasilania: a) bez filtrów, b) z dławikiem silnikowym, c) z filtrem sinusoidalnym, d) z filtrem du/dt

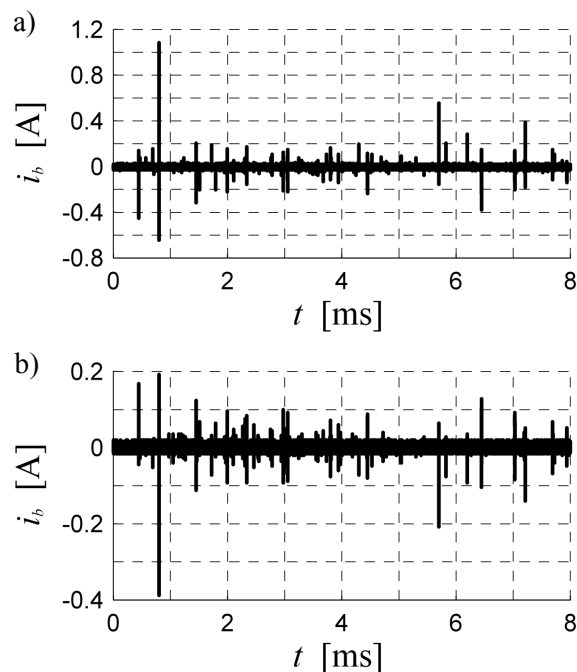
W celu określenia przydatności powyższych filtrów do eliminacji wyladowczych prądów łożyskowych dokonano pomiaru prądu łożyskowego jednocześnie w obu łożyskach silnika. Rejestracje wykonano w szerokim przedziale czasowym, umożliwiającym stwierdzenie występowania szkodliwych dla łożysk prądów łożyskowych. Wyniki badań laboratoryjnych przedstawiono na rysunkach 28-30.



Rys. 28. Wyladowcze prądy łożyskowe w układzie zasilania bez filtrów: a) od strony napędowej, b) od strony przeciwnapędowej



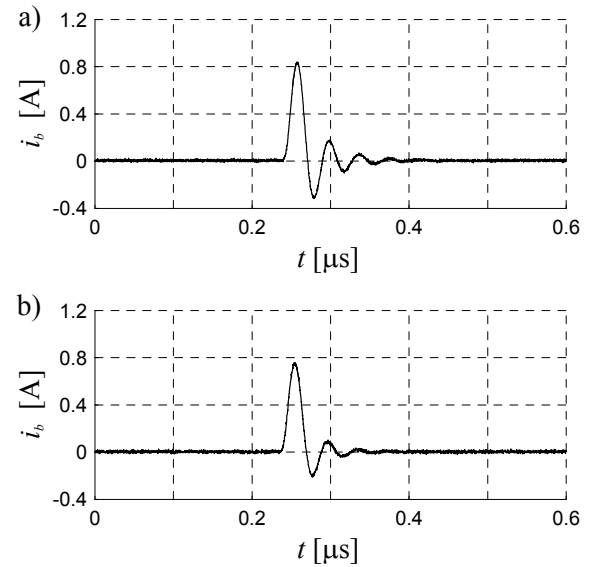
Rys. 29. Wyladowcze prądy łożyskowe w układzie zasilania z filtrem sinusoidalnym: a) od strony napędowej, b) od strony przeciwnapędowej



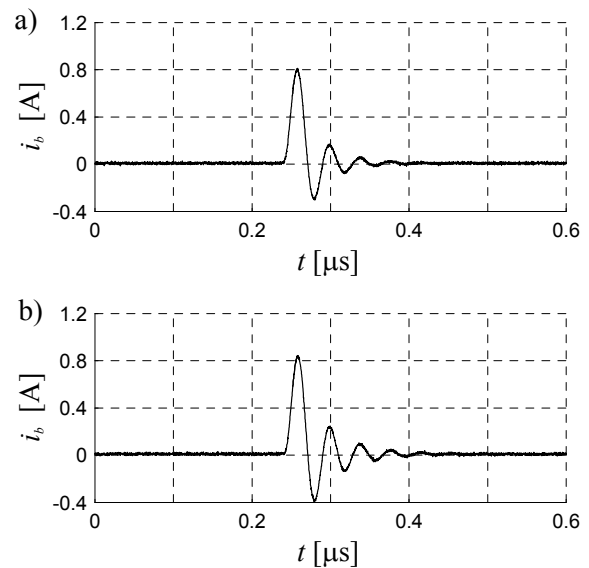
Rys. 30. Wyladowcze prądy łożyskowe w układzie zasilania z filtrem du/dt : a) od strony napędowej, b) od strony przeciwnapędowej

Dodatkowo zarejestrowano pojedyncze impulsy wyladowczych prądów łożyskowych celem określenia wpływu zastosowanych filtrów na

kształt przebiegu. Wyniki przedstawiono na rysunkach 31 i 32.



Rys. 31. Wyladowczy prąd łożyskowy w przypadku układu zasilania: a) bez filtrów, b) z diodą silnikową



Rys. 32. Wyladowczy prąd łożyskowy w przypadku układu zasilania: a) z filtrem sinusoidalnym, b) z filtrem du/dt

Na podstawie analizy zarejestrowanych przebiegów można jednoznacznie stwierdzić, że zastosowanie typowych diod silnikowych, filtrów sinusoidalnych oraz filtrów du/dt nie ogranicza występowania wyladowczych impulsów prądu łożyskowego. Prądy łożyskowe nadal płyną, o wartościach porównywalnych jak w przypadku układów zasilania bez filtrów.

8. Podsumowanie

W przypadku zasilania silnika z przemiennika częstotliwości, dąży się do ograniczenia poziomu zaburzeń generowanych przez sam przemiennik, poprzez odpowiednie ekranowanie, uziemianie, separację galwaniczną oraz stosowanie odpowiednich filtrów. Jednym ze sposobów ograniczania zakłóceń emitowanych z obwodów przemiennika częstotliwości jest stosowanie odpowiedniego algorytmu sterowania łączników energoelektronicznych. Szybkie przełączanie zaworów w falownikach PWM powoduje jednak powstawanie szeregu nie zamierzonych zjawisk pasożytniczych. Do jednych z nich zaliczamy powstawanie wyładowczych prądów łożyskowych. Można je wyeliminować poprzez izolowanie łożysk, uziemienie wału, stosowanie ekranu elektrostatycznego lub zastosowanie w łożyskach smarów elektroprzewodzących. Uziemienie wału można zrealizować poprzez założenie na wał silnika pierścieni typu AEGIS SGR.

Drugim niekorzystnym zjawiskiem jest płynięcie prądów doziemnych w przewodach uzimowych silnika. Istnieje wiele sposobów i technik instalacyjnych do ograniczania tych prądów. Najlepiej nadaje się do tego transformator zaburzeń wspólnych. Skutecznie tłumi on nie tylko wartość maksymalną, ale także średnią i skuteczną prądu uziomu, co jest znaczną jego zaletą w porównaniu z innymi filtrami. W przypadku, gdy nie dysponujemy takim filtrem, to można zastosować odpowiednie kable ekranowane lub toroidalne rdzenie Cool Blue.

Literatura

- [1]. Busse D., Erdman J., Kerkman R., Schlegel D., Skibinski G.: An Evaluation of the Electrostatic Shielded Induction Motor: A Solution for Rotor Shaft Voltage Buildup and Bearing Current. IEEE Transaction on Industry Applications, nr 6, 1997, p. 1563-1570.
- [2]. Buse D., Erdman J.: The Effects of PWM Voltage Source Inverters on the Mechanical Performance of Rolling Bearings. IEEE Transactions on Industry Applications Vol.33, No.2, March/April 1997.
- [3]. Hausberg V., Seinsch H.O.: *Kapazitive Lagerspannungen und -strome bei umrichtergespeisten Induktionsmaschinen*. Electrical Engineering, No. 82, 2000, pp. 153-162.
- [4]. Zientek P.: *Prądy łożyskowe i prąd uziomu w układach napędowych zasilanych z falowników PWM*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 74/2006, ss.69-74.

Autorzy

mgr inż. Piotr Zientek
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych
Politechniki Śląskiej
ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice
tel: 032-2372652
e-mail: Piotr.Zientek@polsl.pl

mgr inż. Roman Niestrój
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych
Politechniki Śląskiej
ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice
tel: 032-2372526
e-mail: Roman.Niestroj@polsl.pl