

Piotr Zientek
 Politechnika Śląska, Gliwice

WPŁYW PARAMETRÓW WYJŚCIOWYCH FALOWNIKÓW PWM I KABLA ZASILAJĄCEGO NA ZJAWISKA PASOŻYTNICZE W SILNIKACH INDUKCYJNYCH

INFLUENCE OF THE PWM INVERTERS OUTPUT PARAMETERS AND POWER CABLE ON THE ADDITIONAL PHENOMENA OCCURING IN INDUCTION MOTORS

Abstract: In the paper additional phenomena occurring in induction motors supplied from PWM inverters are presented. The voltage pulse generated by frequency converter is shown in Fig. 1 and Fig. 2. In Fig. 3 the common-mode voltage for two first inverter voltage output harmonics is shown. In Section 3 voltage generation on the frame of the induction motor supplied from PWM inverter are discussed. Measurement results are presented in Section 6 in Fig. 6 to Fig. 12.

1. Wstęp

Zastosowanie nowoczesnych przekształtników energoelektronicznych pozwala na poprawę własności maszyny indukcyjnej. Wadą tego typu rozwiązania są pojawiające się zjawiska pasożytnicze, które przy zasilaniu sieciowym nie występują lub nie są brane pod uwagę ze względu na ich znikome znaczenie. Stosowanie długich przewodów pomiędzy falownikiem a silnikiem powoduje dodatkowo pogorszenie warunków pracy silnika, co znacznie wpływa na skrócenie jego żywotności oraz zwiększa prawdopodobieństwo awarii. Pojawiają się przepięcia na zaciskach silnika o dużej amplitudzie i wysokiej częstotliwości oscylacji. Parametrami wpływającymi na amplitudę i częstotliwość oscylacji są długość i właściwości elektryczne kabla zasilającego oraz stromość napięciowa (du/dt) impulsów wyjściowych falownika PWM. Z tego powodu pojawiają się wyładowania niezupełne w izolacji zwojowej silnika. Mają one charakter impulsowy o dużej częstotliwości (do setek MHz) i wzbudzają zakłócenia elektryczne i elektromagnetyczne, przez co utrudniają pracę innych urządzeń elektrycznych [1]. W silnikach pracujących w pobliżu, zasilanych z sieci napięcia przemienneho indukują się siły elektromotoryczne będące źródłem prądów upływu płynących w przewodach uziomowych. Konieczne jest zatem stosowanie środków zaradczych ograniczających ujemne skutki stosowania falowników i długich przewodów zasilających silnik.

2. Zjawiska pasożytnicze występujące w silnikach indukcyjnych zasilanych z falowników PWM

W silnikach indukcyjnych zasilanych z falowników PWM występują zjawiska pasożytnicze, do których zalicza się:

- indukowanie się napięcia na korpusach izolowanych silników,
- występowanie napięć wałowych,
- prądy doziemne w silnikach uziemionych,
- napięcia i prądy łożyskowe,
- wzrost temperatury uzwojeń,
- wytwarzanie hałasu o podwyższonym poziomie,
- spadek sprawności silnika,
- emisję zakłóceń elektromagnetycznych,
- prądy ekranowe w kablach ekranowanych,
- powstawanie przepięć na zaciskach silnika.

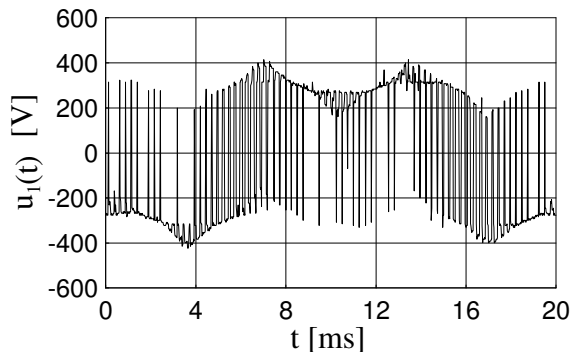
Do przyczyn powstawania tych zjawisk zalicza się:

- dużą częstotliwość przełączania zaworów falownika,
- dużą stromość napięciowa (du/dt) impulsów wyjściowych falownika.

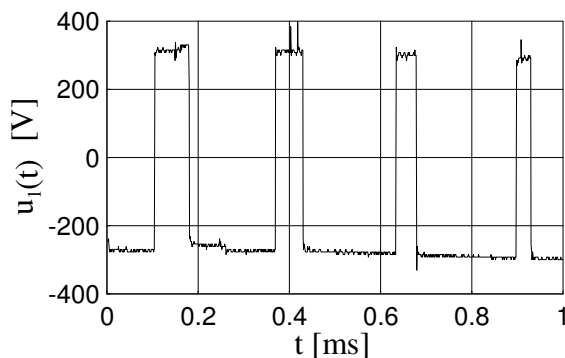
3. Przyczyny napięć na kadłubach nieziemionych silników indukcyjnych zasilanych z falowników PWM

W falownikach PWM wyjściowe napięcia fazowe względem ziemi mają kształt ciągu na przemian występujących dodatnich i ujemnych impulsów prostokątnych o częstotliwości wynikającej z przyjętej modulacji i o przesunięciu fazowym wynikającym z przesunięcia fal sinu-

soidalnych w poszczególnych fazach (rys. 1, rys. 2).



Rys. 1. Przebieg czasowy napięcia fazowego na zaciskach wyjściowych falownika



Rys. 2. Impulsy napięciowe generowane przez przemiennik częstotliwości

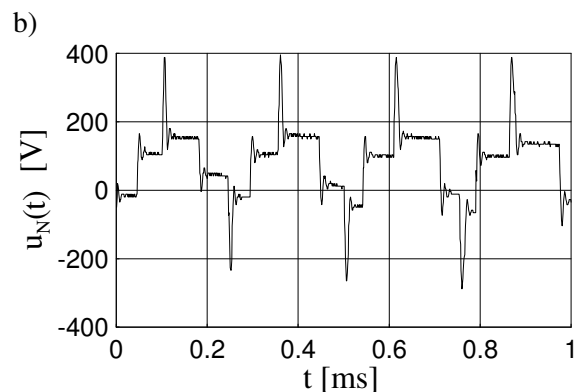
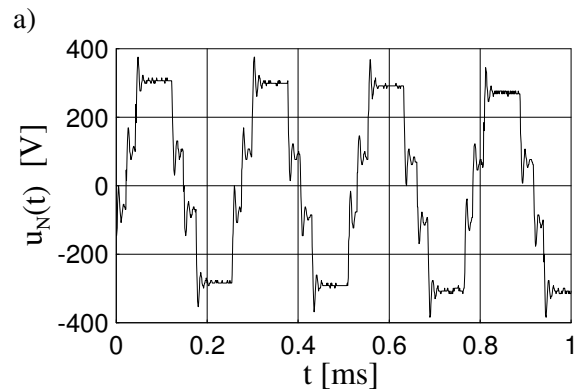
Podczas zasilania silnika 3-fazowym napięciem sinusoidalnym symetrycznym, napięcie w punkcie neutralnym uzwojenia stojana $u_N(t)$ jest równe zero. W przypadku zasilania silnika z falownika PWM suma wartości chwilowych napięć fazowych jest różna od zera w przeciwieństwie do zasilania sieciowego i stanowi napięcie o kształcie krzywej „schodkowej” o wartości szczytowej i częstotliwości równej wartości szczytowej i częstotliwości napięć fazowych (rys. 2). W punkcie neutralnym uzwojenia silnika pojawia się więc wypadkowe napięcie $u_N(t)$ (rys. 2 i 3) względem ziemi (napięcie niezrównoważenia), które wyraża się wzorem:

$$u_N(t) = \frac{u_1(t) + u_2(t) + u_3(t)}{3} \neq 0 \quad (1)$$

gdzie: $u_1(t), u_2(t), u_3(t)$ – wartości chwilowe napięć fazowych na zaciskach silnika

Obecność izolacji pomiędzy uzwojeniem stojana a obwodem magnetycznym oraz to, że w czasie pracy wirnik jest praktycznie odizolowany od pozostałych części silnika (poprzez film olejowy w łożysku) powoduje, że w silniku

powstaje układ pojemności pomiędzy jego elementami składowymi.



Rys. 3. Napięcie w punkcie neutralnym uzwojenia stojana silnika zasilanego z falownika PWM: a) dla częstotliwości wyjściowej $f=20\text{Hz}$, b) dla częstotliwości $f=50\text{Hz}$

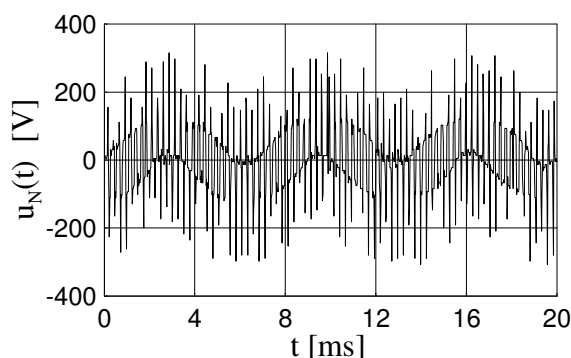
Pojemności te zwane są „pojemnościami wewnętrznymi silnika”, których elektrodami są uzwojenie stojana oraz rdzeń stojana i wirnika, a dielektrykiem jest izolacja przewodów zwojowych, izolacja żłobkowa, szczelina powietrzna oraz film olejowy w łożyskach.

Pojemności wewnętrzne silników indukcyjnych niskiego napięcia są parametrami praktycznie pomijalnymi przy ich projektowaniu i badaniu, bowiem przy zasilaniu sieciowym nie mają one istotnego znaczenia dla użytkowników. Wartość tych pojemności jest rzędu kilku nF. Nabierają one znaczenia dopiero przy zasilaniu z falowników PWM, bowiem wpływają w sposób istotny na procesy przejściowe i zjawiska pasożytnicze powstające w obwodzie maszyny, dlatego znajomość ich wartości ma zasadnicze znaczenie dla określenia wielkości zjawisk ubocznych powstających w elementach konstrukcyjnych silników.

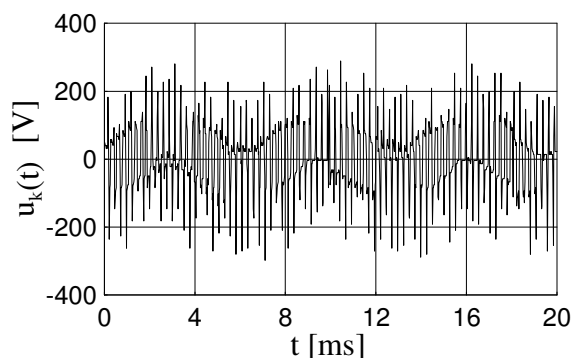
Przy zasilaniu silników napięciem sinusoidalnym o małej częstotliwości ($f \leq 50\text{Hz}$) impedancje pasożytnicze są bardzo duże i nie od-

grywają większego znaczenia w powstawaniu zjawisk pasożytniczych w silniku. W przypadku zasilania silników z falowników PWM, gdzie szybkość narastania napięcia wyjściowego dochodzi do $1800 \text{ V}/\mu\text{s}$ pojemności wewnętrzne silnika i kabla zasilającego zaczynają odgrywać dużą rolę w powstawaniu napięć na elementach konstrukcyjnych silnika oraz mają duży wpływ na napięcie na zaciskach silnika. W silniku indukcyjnym powstaje pojemnościowy dzielnik napięcia, który powoduje, że napięcie punktu neutralnego przenosi się na kadłub poprzez pojemności wewnętrzne (pasożytnicze) uzwojenia względem kadłuba (rys. 4).

a)



b)



Rys. 4. Przebieg czasowy napięć: a) w punkcie neutralnym uzwojenia stojana, b) na kadłubie silnika izolowanego od podłoża.

Jak widać napięcie na kadłubie silnika ma kształt identyczny jak napięcie w punkcie neutralnym uzwojeń silnika, jednak jego wartość jest nieznacznie mniejsza i zależy od wartości pojemności pasożytniczych silnika.

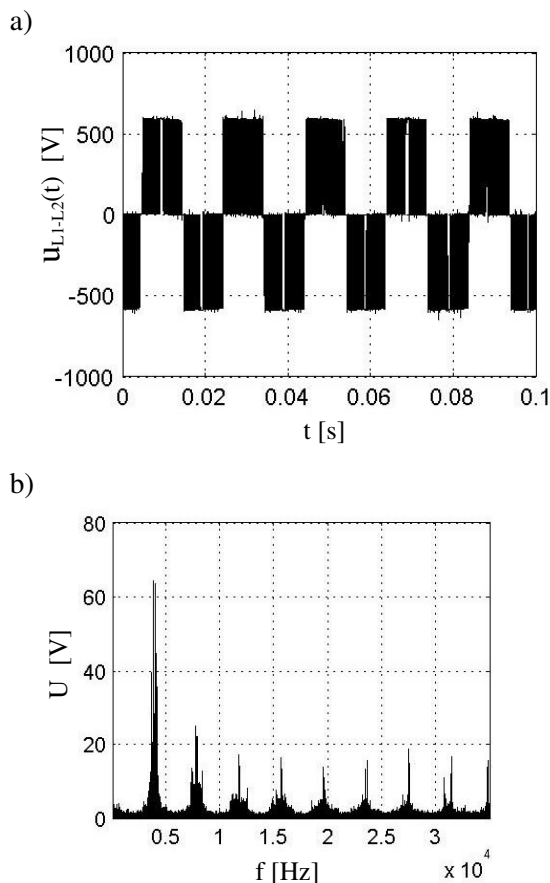
4. Prądy doziemne w silnikach uziemionych

Podczas eksploatacji silników indukcyjnych w celu spełnienia warunków ochrony przeciw-

porażeniowej kadłuby silników są uziemione. Przy zasilaniu silnika z falownika PWM w przewodach uziomowych płynie prąd, który jest wynikiem ładowania i rozładowania pojemności wewnętrznych silnika. Prąd ten ma charakter impulsowy i płynie tylko w czasie zmiany polaryzacji układu pojemnościowego. Amplitudy tych prądów mogą osiągać wartość kilku amper, natomiast wartość skuteczna prądu uziemienia jest zależna od impedancji przewodu uziemienia, częstotliwości sterowania zaworów falownika oraz od częstotliwości składowej podstawowej harmonicznej napięcia zasilania.

5. Emisja zakłóceń elektromagnetycznych na różnym poziomie częstotliwości

W celu zapewnienia zmiany prędkości silnika indukcyjnego przez falownik PWM wytwarzany jest trójfazowy przebieg napięcia o regulowanej wartości częstotliwości pierwszej harmonicznej. W związku z tym prócz harmonicznej podstawowej otrzymuje się także harmoniczne napięcia wyższego rzędu (rys. 5). Pojawiają się harmoniczne napięcia o podstawowej składowej od 0 do około 50 Hz, pasma częstotliwości fali nośnej na poziomie kHz oraz harmoniczne wyższego rzędu, wynikające ze stromości przełączania kluczy tranzystorowych (IGBT). Pierwszy zakres częstotliwości jest z punktu widzenia zakłóceń w kablu podłączonym do wyjścia falownika mało istotny, natomiast drugi generuje zjawiska niepożądane wynikające z ujawnienia się pojemności pasożytniczej kabla silnikowego i silnika indukcyjnego. Trzeci i ostatni zakres częstotliwości odpowiada za emisję zakłóceń elektromagnetycznych (na poziomie MHz) do otoczenia. Zakłócenia te rozchodzą się swobodnie we wszystkich kierunkach. Kabel silnikowy w układzie z falownikiem PWM stanowi podstawowe źródło zakłóceń elektromagnetycznych całego układu automatyki maszyny. W silnikach znajdujących się w pobliżu, zasilanych z sieci napięcia przemiennego indukują się siły elektromotoryczne będące źródłem prądów upływu płynących w przewodach uziomowych. Konieczne jest więc stosowanie ekranowanych przewodów silnikowych spełniających wymagania emisji zakłóceń według normy PN-EN 55011.



Rys. 5. Przebieg napięcia na wyjściu falownika - a) i jego transformata Fouriera (bez podstawowej harmonicznej) - b)

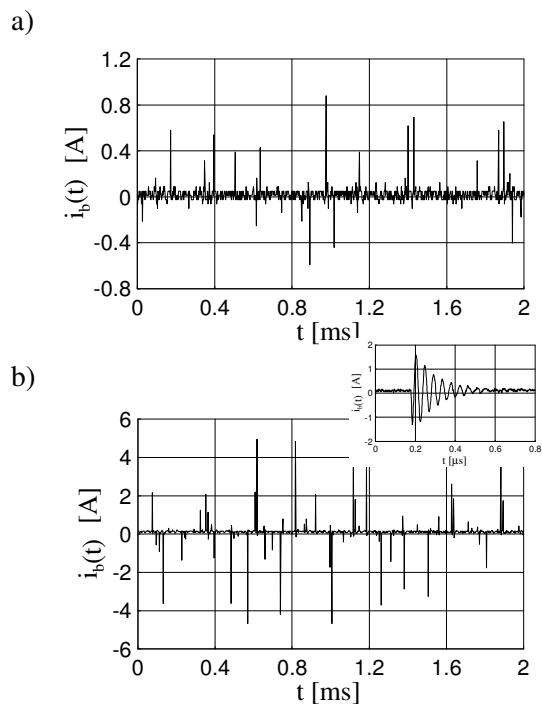
6. Badania laboratoryjne

6.1. Wpływ ekranowanych kabli silnikowych na redukcję prądów łożyskowych

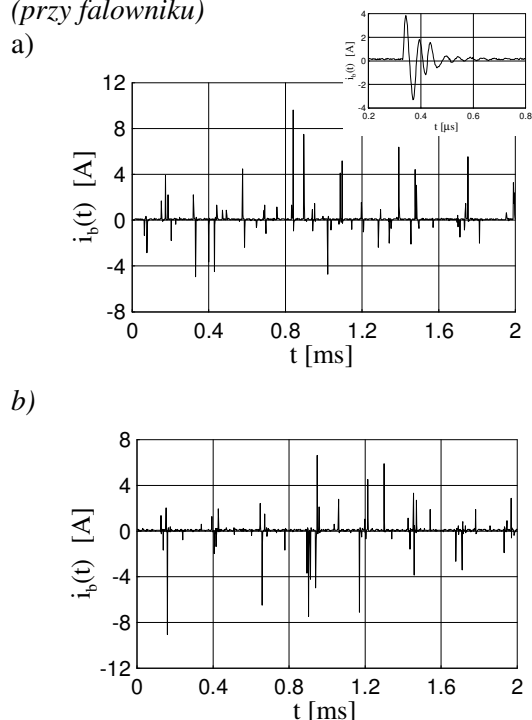
Do badań laboratoryjnych wykorzystano silnik indukcyjny o danych:

Typ: Sf132, $U_n = 220/380$ V, $I_n = 20,2/11,7$ A, $n_n = 1450$ obr/min, $\cos\varphi_n = 0,84$.

Silnik ten zasilano z falownika PWM różnymi kablami celem określenia ich wpływu na wartość prądów łożyskowych. Badania laboratoryjne wykazały, że skutecznym sposobem redukcji prądów łożyskowych jest zapewnienie odpowiedniego systemu okablowania silnika. Na rys. 6 i 7 przedstawiono przebiegi prądu łożyskowego w przypadku zasilania silnika kablem ekranowanym w pełni symetrycznym, kablem nieekranowanym oraz przy zastosowaniu obu kabli jednocześnie. Dodatkowo na rys. 6 przedstawiono przebieg prądu łożyskowego dla źle wykonanego uziemienia ekranu kabla.



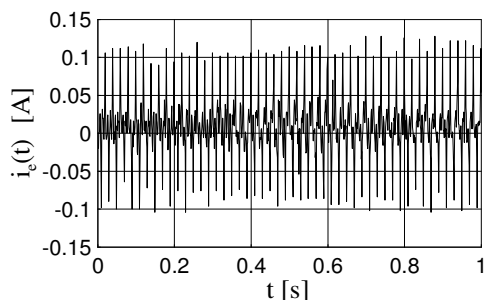
Rys. 6. Przebieg prądu łożyskowego przy zastosowaniu kabla ekranowanego przy: a) obustronnym uziemieniu ekranu kabla, b) jednostronnym uziemieniu ekranu kabla (przy falowniku)



Rys. 7. Przebieg prądu łożyskowego: a) przy zasilaniu silnika kablem nieekranowanym, b) przy połączeniu odcinka kabla ekranowanego i nieekranowanego

Z powyższych przebiegów widać, że aby ekran spełniał poprawnie swoją rolę, konieczne jest

uziemienie go na obu końcach w celu umożliwienia przepływu prądu generowanego przez zjawiska polowe i pojemności pasozytnicze. Prąd ten nazywany jest prądem ekranu (rys. 8) i pomniejsza emisję zakłóceń elektromagnetycznych na zewnątrz powierzchni wyznaczonej przez ekran.

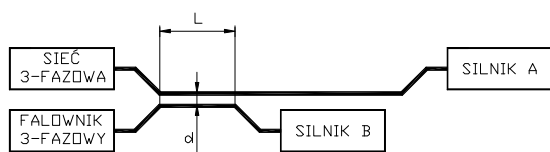


Rys. 8. Przebieg prądu ekranu

W celu zapewnienia prawidłowego przepływu tego prądu konieczne jest takie podłączenie ekranu na obydwu końcach, które zapewnia kontakt elektryczny na całym obwodzie ekranu (360°). Złe wykonanie połączenia ekranu kabla z masą powoduje znaczny wzrost wartości prądów łożyskowych, co jest związane z szybszym uszkodzeniem łożysk.

6.2. Wpływ zakłóceń elektromagnetycznych na pracę innych układów napędowych

Stanowisko pomiarowe składało się z dwóch silników indukcyjnych, falownika PWM, dławika silnikowego oraz długich kabli zasilających ekranowanych w pełni symetrycznych i nieekranowanych (rys. 9).



Rys. 9. Schemat układu pomiarowego

Silnik B zasilany był z falownika przewodem o długości 13m, natomiast silnik A bezpośrednio z sieci przewodem o długości 20m. Oba przewody położone są równoległe obok siebie na długości L . Badania te polegały na rejestrowaniu prądu uziomu płynącego w przewodzie uziomowym silnika A przy powiększaniu odległości d między przewodami oraz przy zastosowaniu dławika silnikowego za falownikiem i różnych kabli zasilających. Przedziały występowania maksymalnej wartości prądu uziomu w zależności od konfiguracji układu zasilania przedstawiono w tabeli 1 i na rys. 10.

Tabela 1. Zakres występowania maksymalnej wartości prądu uziomu

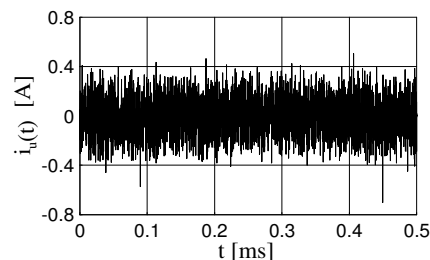
	odległość d między przewodami	
	0 m	2 m
Kabel nieekranowany	0,20...0,40 A	0,15...0,30 A
Kabel nieekranowany + dławik silnikowy	0,04...0,06 A	0,03...0,05 A
Kabel ekranowany	0,02...0,09 A	0,03...0,07 A
Kabel ekranowany + dławik silnikowy	0,01...0,05 A	0,01...0,03 A

Prąd uziomu jest wynikiem istnienia następujących sprzężeń od zakłóceń:

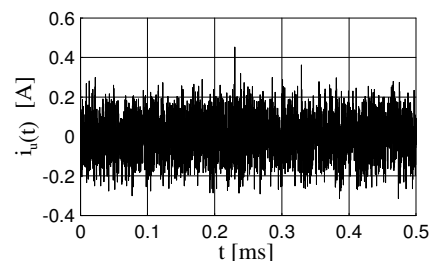
- **sprzężenie pojemnościowe** – wytwarzane przez przewody obwodu zakłócającego pole elektryczne wywołuje na drodze indukcji elektrycznej napięcie w przewodach obwodu wrażliwego,
- **sprzężenie indukcyjne** - strumień magnetyczny wytworzony przez linię zakłócającą przenika częściowo przez pętle tworzone przez obwody układu zakłócanego,
- **sprzężenie poprzez wspólną gałąź prądową** - gdy dwa lub więcej obwodów wykorzystuje ten sam przewód powrotny,
- **sprzężenie poprzez pole elektromagnetyczne**.

Jak widać z tabeli 1 w przypadku zastosowania kabla ekranowanego uzyskuje się znaczne ograniczenie wartości prądu uziomu oraz ograniczenie sprzężeń od zakłóceń.

a)



b)

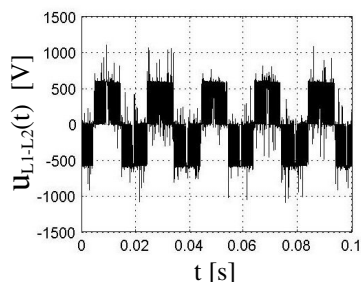


Rys. 10. Przebieg prądu uziomu w przypadku kabli oddalonych na odległość d : a) 0 m, b) 2 m

6.3. Przepięcia na zaciskach silnika

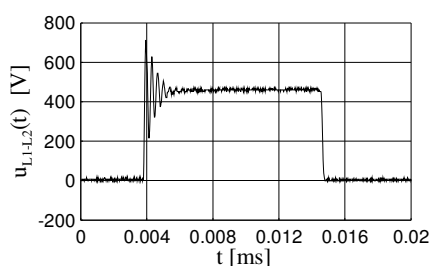
Jednym ze skutków zasilania silnika z falownika PWM są pojawiające się przepięcia na zaciskach silnika (rys. 11). Są one wywołane głównie zjawiskiem powielenia napięcia wyni-

kającego z istniejącego niedopasowania impedancji linii oraz impedancji obciążenia (silnika).

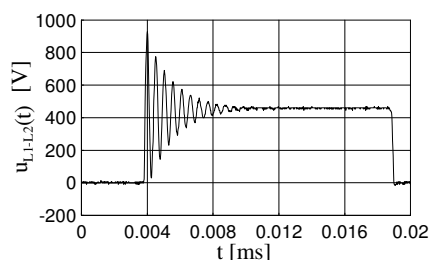


Rys. 11. Przebieg napięcia na zaciskach silnika zasilanego przewodem o długości 10m

a)



b)



Rys. 12. Pojedynczy impuls napięcia PWM na zaciskach silnika w przypadku zasilania silnika przewodem o długości: a) 2m, b) 10m

Przy zasilaniu długimi przewodami, napięcie na zaciskach silnika może osiągnąć podwójną wartość napięcia panującego w obwodzie pośredniczącym napięcia stałego przemiennika. W przypadku, gdy impedancja charakterystyczna obciążenia jest większa niż impedancja linii to napięcie i prąd ulega odbiciu od obciążenia w kierunku źródła zasilania (falownika). Wtedy na zaciskach silnika można oczekiwać pojawienia się najwyższej wartości szczytowej napięcia. Napięcie to jest równe sumie chwilowej wartości szczytowej napięcia wysyłanego w kierunku silnika oraz odbitej wartości napięcia szczytowego. Ze względu na występujące w kablu silnikowym wyższe harmoniczne napięcia, już kable o długości około 10 m należy traktować jako „linie długie”, ponieważ zachodzą w nich zjawiska falowe. Na zaciskach silnika pojawiają się przepięcia o charakterze drgań aperiodycz-

nych, gasnących o częstotliwości około 2 MHz. Na rys. 12 przedstawiono pojedynczy impuls napięcia PWM na zaciskach silnika zasilanego kablem o długości 2 i 10 m.

7. Podsumowanie

Zastosowanie falowników PWM pozwala na poprawę własności maszyny indukcyjnej, ale powoduje także trudności z zapewnieniem kompatybilności elektromagnetycznej (EMC) układu napędowego. Wykorzystywanie falowników PWM do zasilania silników indukcyjnych powoduje, że problemy te stanowią aktualnie rozwijaną tematykę badawczą.

W silnikach indukcyjnych zasilanych z przemienników częstotliwości płyną prądy łożyskowe powodujące erozję bieżni łożysk, co w konsekwencji prowadzi po kilkuset godzinach pracy do uszkodzenia łożyska. Badania laboratoryjne wykazały, że zastosowanie ekranowanych i symetrycznych kabli do zasilania silnika ogranicza emisję zakłóceń elektromagnetycznych i ogranicza wartości prądów łożyskowych. Na wielkość tych prądów mają wpływ parametry obwodu komutacyjnego falownika i parametry silnika, przede wszystkim wartość pojemności wewnętrznych silnika. Dlatego znajomość ich wartości ma zasadnicze znaczenie dla określenia wielkości zjawisk ubocznych powstających w elementach konstrukcyjnych silników.

Literatura

- [1].Glinka T., Kulesz B.: *Wyładowania niezupełne w izolacji zwojowej silników indukcyjnych zasilanych z falowników PWN*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr. 49, 2000 rok, ss. 96-103
- [2].Krzemień Z.: *Pomiary i analiza zjawisk ubocznych występujących w silnikach indukcyjnych zasilanych z falowników PWM*. Sympozjum PPEE' 97, Ustroń 1997, ss. 211–216.
- [3].Krzemień Z.: *Prądy doziemne i łożyskowe występujące w silnikach indukcyjnych zasilanych z falowników PWM*. VI Seminarium Techniczne, maj 1997, Ustroń, ss. 141-146.

Autor

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

