

**Piotr Zientek**  
 Politechnika Śląska, Gliwice

## **PRĄDY ŁOŻYSKOWE I PRĄD UZIOMU W UKŁADACH NAPĘDOWYCH ZASILANYCH Z FALOWNIKÓW PWM**

### **BEARING CURRENTS AND LEAKAGE CURRENT IN PWM INVERTER DRIVES**

**Abstract:** The paper presents analysis of forming of the induction motor bearing currents and leakage currents. In chapter 2 the causes at common-mode voltage and shaft voltage formation are described. That voltages are both the cause of EDM bearing currents forming. In chapter 3 are presented different types of parasitic phenomena caused by common-mode voltage. Internal capacitances of the induction motor is shown in Fig.5. Figure 8 shows EDM bearing currents formation. Leakage currents in induction motors supplied from PWM Inverter are presented in chapter 4. Chapter 5 describes methodes for limiting bearing currents in PWM drives.

#### **1. Wstęp**

Problematyka występowania zaburzeń w układach napędowych jest tematyką szeroko poruszaną przez ośrodki naukowe i przemysłowe. Jednym z podstawowych źródeł powstawania zakłóceń w układach napędowych są obwody z tranzystorami IGBT oraz MOSFET. Zaburzenia wynikają głównie z dużych stromości narastania napięć oraz prądów i mogą być generowane zarówno do obwodów wejściowych jak i wyjściowych przemiennika częstotliwości. Z występowaniem zaburzeń w układach napędowych wiąże się szeroko poruszany problem jakim jest odpowiednie sterowanie maszyną elektryczną poprzez falownik PWM. Z problematyką sterowania silnikiem elektrycznym związane są dwa podstawowe zagadnienia: symetryczność budowy silnika oraz symetryczność napięć zasilających. Z niesymetrycznym zasilaniem ma się do czynienia w przypadku zasilania silnika z falownika PWM. Przy rozpatrywaniu niesymetrii zasilania, składowe prądu przeciwnej i zerowej kolejności faz przyczyniają się do zwiększenia strat w silniku, co w konsekwencji prowadzi do obniżenia jego sprawności. 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. Poważnym problemem są trudności z utrzymaniem symetrii

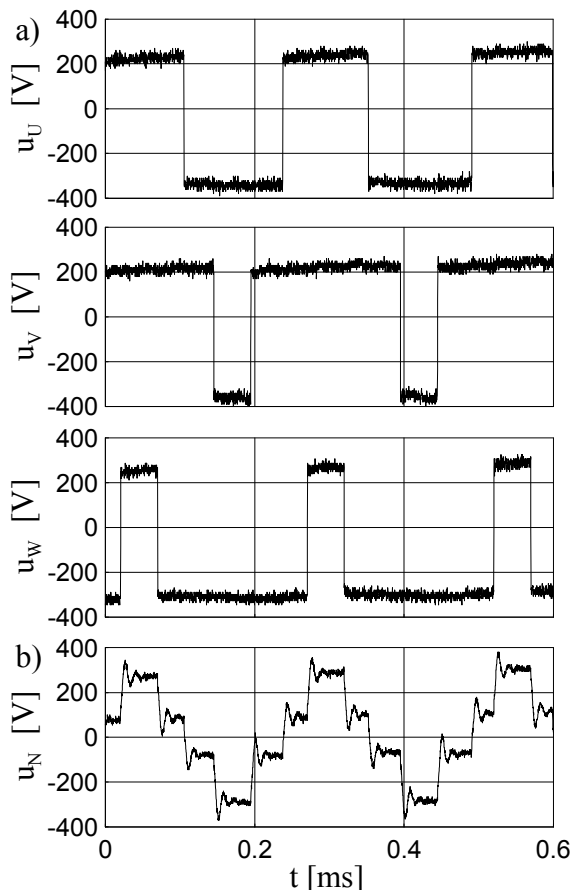
wewnętrznej w budowie silnika. Pojawiające się niesymetrie mogą wynikać z błędu technologicznego na etapie projektowania silnika, jak również ze sposobu jego wykonania. Najczęściej są to niesymetrie w obwodzie magnetycznym wynikające z pakietowania blach stojana oraz z nierównomiernej szczeliny powietrznej. Nieuwzględnienie powyższej problematyki na etapie projektowania całego układu napędowego prowadzi do powstania szeregu nie zamierzonych zjawisk pasożytniczych. 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. Przyczyny powstawania napięcia walowego

Zasilanie falownikowe jest szczególnym przypadkiem zasilania niesymetrycznego. 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 sinusoidalnych w poszczególnych fazach. 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. 1).



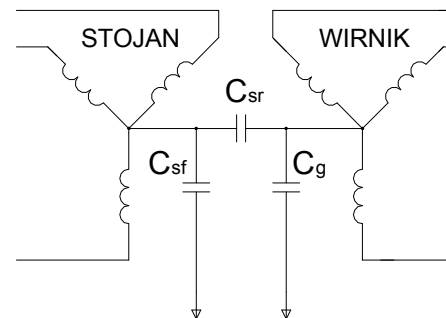
Rys. 1. Przebieg czasowy: a) napięć fazowych na zaciskach wyjściowych falownika, b) napięcia w punkcie neutralnym uzwojenia stojana

W punkcie neutralnym uzwojenia stojana silnika pojawia się więc wypadkowe napięcie  $u_N(t)$  zwane napięciem niezrównoważenia (rys. 1b), które wyraża się wzorem:

$$u_N(t) = \frac{u_U(t) + u_V(t) + u_W(t)}{3} \neq 0 \quad (1)$$

gdzie:  $u_U(t), u_V(t), u_W(t)$  – 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 łożyskach) powoduje, że w silniku powstaje układ pojemności pomiędzy jego elementami składowymi. 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 (rys. 2).

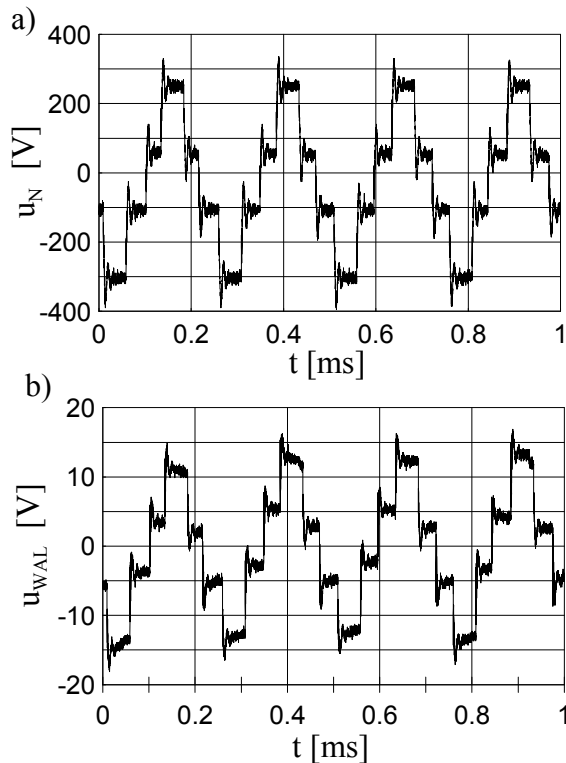


Rys. 2. Pojemności wewnętrzne w silniku indukcyjnym

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 dodatkowe powstające w obwodzie maszyny, dlatego znajomość ich wartości ma zasadnicze znaczenie dla określenia skali 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 odgrywają większego znaczenia w powstawaniu zjawisk pasożytniczych w silniku. W przypadku zasilania silników z falowników PWM, gdzie szybkość narastania napięcia wyjściowego dochodzi do  $1500\text{V}/\mu\text{s}$  [1] 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 (rys. 2), który powoduje, że napięcie punktu neutralnego przenosi się na kadłub oraz na wał silnika. Na rysunku 3 przedstawiono przebieg napięcia niezrównoważenia oraz napięcia wałowego w silniku z izolowanymi łożyskami.



Rys. 3. Przebieg czasowy napięć: a) w punkcie neutralnym uzwojenia stojana, b) na wale silnika z izolowanymi łożyskami

Korzystając z rysunku 2, napięcie wałowe można wyrazić w postaci

$$u_{WAL}(t) = \frac{C_{sr}}{C_{sr} + C_b + C_g} u_N(t) \quad (2)$$

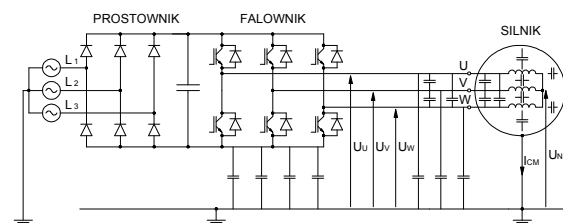
Pojemności wewnętrzne występujące w silniku zmierzone mostkiem transformatorowym typu: BM484 dla silnika o mocy  $P_n = 5.5$  kW wynoszą:

$$C_{sf} = 3,55 \text{ nF}, C_{sr} = 0,05 \text{ nF}, C_g = 1,41 \text{ nF}.$$

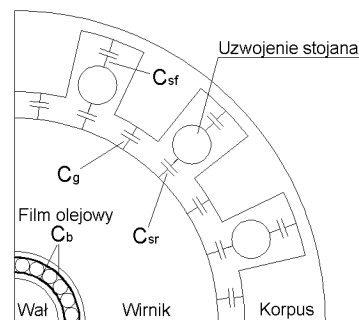
Jak widać z rysunku 3 napięcie wałowe silnika ma kształt identyczny jak napięcie w punkcie neutralnym uzwojenia stojana, a jego wartość w dużej mierze zależy od pojemności pomiędzy uzwojeniem stojana a wirnikiem. Napięcie to ma duży wpływ na powstawanie prądu łożyskowego.

### 3. Zjawiska pasożytnicze spowodowane napięciem niezrównoważenia

Napięcie niezrównoważenia powstające w wyniku niesymetrii układu zasilania jest głównym źródłem powstawania pasożytniczych prądów doziemnych. Duża wartość stromości tego napięcia ( $du_N/dt$ ) wzbudza prądy zaburzeń wspólnych w rozłożonych pojemnościach pasożytniczych układu napędowego. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono sprzężenia pojemnościowe w układzie napędowym i w samym silniku mające decydujący wpływ na przepływ tych prądów.

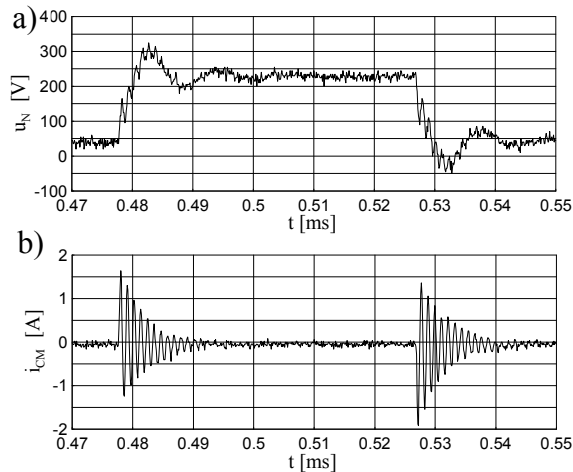


Rys. 4. Rozłożone pojemności pasożytnicze układu napędowego PWM



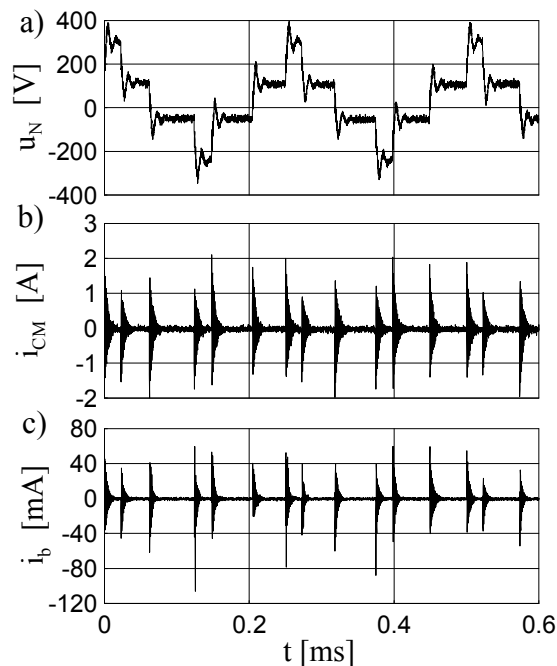
Rys. 5. Rozłożone pojemności pasożytnicze w silniku indukcyjnym

Prądy zaburzeń wspólnych płyną w przewodzie uziomowym silnika. Mają one charakter tłumionych impulsów oscylacyjnych, występujących w momencie przełączania zaworów falownika. Ich amplituda zależy od wartości pojemności pasożytniczych w układzie napędowym i może osiągać wartość kilku amperów. Częstotliwość oscylacji tych impulsów zawiera się w granicach od kilkunastu kiloherców do kilku megaherców. Przykładowy przebieg napięcia niezrównoważenia oraz prądu w przewodzie uziomowym silnika przedstawiono na rysunku 6.



Rys.6. Przebieg czasowy: a) napięcia nie-zrównoważenia, b) prądu w przewodzie uziomowym silnika

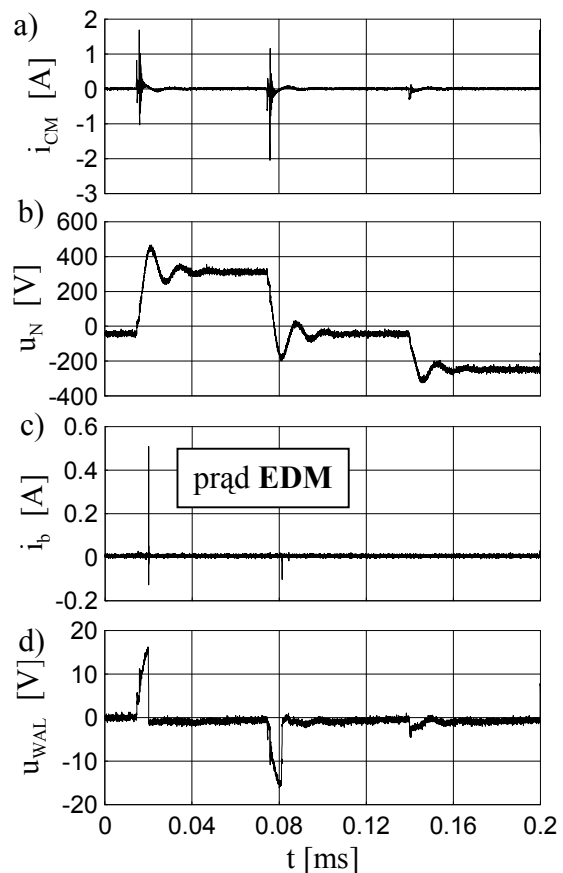
Część prądu zaburzeń wspólnych płynie z uzwojeń silnika przez pojemności pasozytne do wału, a stąd przez łożysko do uziemionej obudowy silnika. Ze względu na dużą impedancję tej drogi, prądy płynące przez łożysko mają małe wartości (rys. 7). Nie mają zatem wpływu na szybkie zużywanie się łożysk.



Rys.7. Przebieg czasowy: a) napięcia nie-zrównoważenia, b) prądu w przewodzie uziomowym silnika, c) prądu łożyskowego

Duża stromość napięcia  $du_N/dt$  w punkcie neutralnym uzwojenia stojana pobudza sprzężenia pojemnościowe w silniku. Pojemności pasozytne pomiędzy uzwojeniem stojana a wirnikiem mogą doprowadzić do powstania napięcia na wale, które z kolei może spowodować prze-

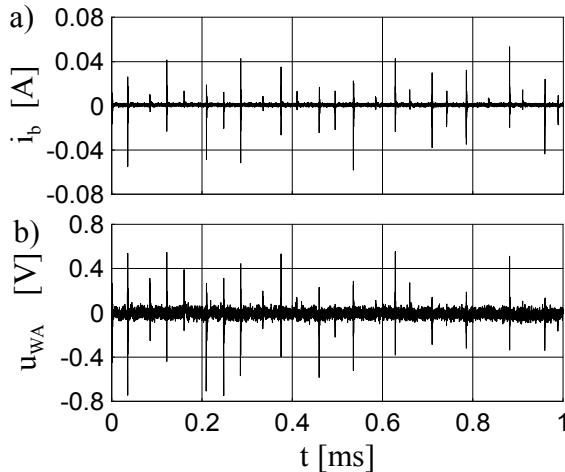
ływ wyładowczych prądów łożyskowych EDM stanowiących poważne zagrożenia dla mechanicznej trwałości łożysk. Napięcie wałowe powoduje ładowanie pojemności pasozytnej widzianej od strony łożyska. W wyniku przekroczenia wartości progowej napięcia przebicia cienkiej warstwy filmu olejowego, następuje rozładowanie pojemności pasozytnej widzianej od strony łożyska, wynikiem czego są powstające wyładowcze prądy łożyskowe EDM. Na rysunku 8 przedstawiono mechanizm powstania wyładowczego prądu łożyskowego EDM (Electric Discharge Machining).



Rys.8. Przebieg czasowy: a) prądu zaburzeń wspólnych, b) napięcia w punkcie neutralnym uzwojenia stojana, c) wyładowczego prądu łożyskowego EDM, d) napięcia wałowego

Prąd ten przyjmuje dużo większe wartości niż prąd łożyskowy powstający w wyniku stanów nieustalonych związanych z przełączaniem zaworów falownika i stanowi poważne zagrożenie dla łożysk. Wartości maksymalne prądu EDM nawet w małych silnikach mogą osiągać wartość kilku amper. Duża energia wyładowania w małym obszarze łożyska może spowodować miejscowe mikrouszkodzenia bieżni, które zapoczątkowują proces degradacji elektrycznej

i mechanicznej łożyska. W przypadku ciągłej pracy układu napędowego, zniszczenie łożysk może nastąpić już po upływie kilku miesięcy [2]. Można temu przeciwdziałać poprzez stosowanie w łożyskach smaru elektroprowadzącego, zmniejszającego impedancję łożyska. Przebieg wyładowczego prądu łożyskowego i napięcia wałowego po zastosowaniu takiego smaru w łożyskach silnika przedstawiono na rysunku 9.

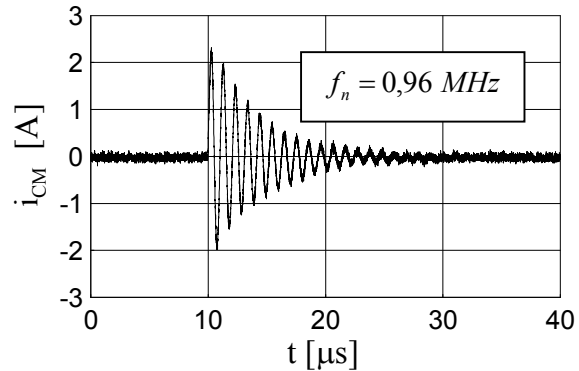


Rys.9. Przebieg czasowy: a) prądu łożyskowego, b) napięcia wałowego, po zastosowaniu smaru elektroprowadzącego w łożyskach

Badania laboratoryjne wykazały, że zastosowanie smaru elektroprowadzącego w łożyskach całkowicie likwiduje występowanie wyładowczych prądów łożyskowych EDM.

#### 4. Prądy doziemne w silnikach uziemionych

Podczas eksploatacji silników indukcyjnych, w celu spełnienia warunków ochrony przeciwporażeniowej, kadłuby silników są uziemione. Przy zasilaniu silnika z falownika PWM w przewodzie uziomowym płynie prąd, który jest wynikiem ładowania i rozładowania pojemności wewnętrznych silnika. Prąd ten ma charakter tłumionych impulsów oscylacyjnych (rys.10) o częstotliwości oscylacji  $f_n=0,96\text{MHz}$ , i płynie tylko w czasie zmiany polaryzacji układu pojemnościowego. Amplituda tego prądu może osiągać wartość kilku amper, natomiast wartość skuteczna prądu uziemienia jest zależna od impedancji drogi przepływu, częstotliwości sterowania zaworów falownika oraz od częstotliwości składowej podstawowej harmonicznego napięcia zasilania.



Rys.10. Prąd zaburzeń wspólnych w przewodzie uziomowym silnika

Prąd ten ma charakter podobny do prądu w obwodzie szeregowym RLC po podaniu skoku napięcia zasilania. W celu przeanalizowania jak wpływa czas narastania impulsów wyjściowych falownika na wartość tego prądu sporządzono schemat zastępczy obwodu, w którym zamyka się ten prąd, który później poddano symulacji w programie komputerowym Pspice. Przebieg prądu zaburzeń wspólnych z rysunku 10 aproksymowano w programie Mathcad poleceniem Genfit używając algorytmu minimalizacji błędu średniokwadratowego za pomocą następującego równania:

$$i_{CM}(t) = \frac{E}{Z_0} e^{-\zeta\omega_n t} \cdot \sin(\omega_n t) \quad (3)$$

gdzie:

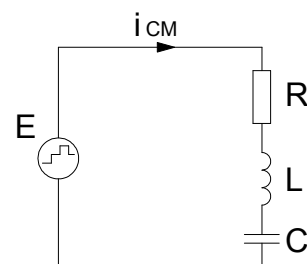
$\omega_n$  – częstotliwość rezonansowa,

$\zeta$  - współczynnik tłumienia,

$Z_0$  – impedancja charakterystyczna,

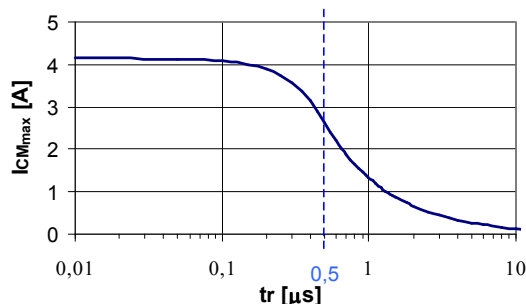
$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad \zeta = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4)$$

Wyliczone parametry RLC z równań (4) wykorzystano następnie w modelu symulacyjnym przedstawionym na rysunku 11.



Rys.11. Schemat zastępczy obwodu symulacyjnego prądu w przedziale uziomowym silnika

Wyniki obliczeń symulacyjnych przedstawiono na rysunku 12.



Rys. 12. Zależność wartości maksymalnej prądu w przewodzie uziomowym silnika od czasu narastania impulsu wyjściowego falownika

Analizując wyniki symulacji komputerowej można sformułować następujący wniosek: wartość maksymalna prądu w przewodzie uziomowym silnika znacznie zmniejsza się w przypadku, gdy czas narastania impulsów wyjściowych napięcia falownika PWM jest większy niż 1/2 okresu oscylacji pojawiających się aperiodycznych impulsów prądu w przewodzie uziomowym silnika.

## 5. Metody ograniczania prądów łożyskowych w układach napędowych PWM

Ograniczanie skutków powstawania wyładowczych prądów łożyskowych EDM można przeprowadzić już na etapie projektowania falownika PWM poprzez odpowiedni dobór algorytmu sterowania zaworów, likwidując w ten sposób przyczynę ich powstawania (napięcie nierównoważenia). W przypadku, gdy prądy łożyskowe już występują należy stosować inne sposoby bezpośrednio ograniczające ten prąd. Do znanych od dawna metod można zaliczyć izolowanie łożysk, uziemienie wału, stosowanie ekranu elektrostatycznego lub zastosowanie w łożyskach smarów elektroprzewodzących. W celu eliminacji prądu w przewodzie uziomowym silnika należy stosować różnego rodzaju filtry pasywne (dławik silnikowy, dławik zaburzeń wspólnych, transformator zaburzeń wspólnych) oraz bardziej rozbudowane i coraz częściej stosowane filtry aktywne.

## 6. Podsumowanie

W układach napędowych zasilanych z falowników PWM występuje wiele zjawisk pasożytniczych niekorzystnych dla samego silnika.

Jednym z nich są wyładowcze prądy łożyskowe EDM stanowiące poważne zagrożenie dla łożysk silników indukcyjnych.

Ważnym parametrem warunkującym występowanie prądów EDM jest odpowiednio duża prędkość obrotowa silnika. Gdy rośnie prędkość obrotowa silnika, wzrasta również rezystancja łożysk. Przyjmuje ona wtedy wartość z zakresu kiloomów, a tworzący się film olejowy w łożysku powoduje, że łożysko ma charakter pojemnościowy. Powstaje wtedy napięcie na wale silnika, następstwem którego jest powstanie dużego natężenia pola elektrycznego, które to po przekroczeniu wytrzymałości elektrycznej filmu olejowego łożyska jest źródłem powstawania rozładowczych prądów łożyskowych EDM.

Silniki obciążone są bardziej odporne na działanie prądów EDM niż silniki nie obciążone, ponieważ elementy toczne są wtedy w ciągłym kontakcie z bieżniami łożyska. Podobnie, w łożyskach gorszej jakości elementy toczne zwierają bieżnie łożyska, co uniemożliwia powstawanie napięcia wałowego. Praktycznie w łożyskach tych nie występują prądy EDM, płyną natomiast prądy związane z szybkim narostem napięcia niezrównoważenia ( $du_N/dt$ ) wywołane przełączeniem zaworów falownika. Prądy te osiągają małe wartości i nie stwarzają zagrożenia dla łożysk silnika. Duża wartość tego prądu przepływa przez przewód uziomowy silnika, stwarzając zagrożenie dla obsługi oraz powodując błędne działanie zabezpieczeń upływnościowych.

## Literatura

- [1]. Jakubiec M., Polak A.: *Dodatkowe zjawiska pasożytnicze występujące w silnikach indukcyjnych zasilanych napięciem odkształconym*. Wiadomości Elektrotechniczne, nr 6, 2000, s. 312-315.
- [2]. Laitinen M.: *Prądy łożyskowe w nowoczesnych systemach napędowych*. Napędy i sterowanie, nr 1, styczeń 2000, s. 6-10.

## 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](mailto:Piotr.Zientek@polsl.pl)