

Zastosowanie dławika składowej zerowej w falownikowym napędzie silnika indukcyjnego

Jarosław Guziński

Jednym z niekorzystnych efektów zastosowania falowników w napędach elektrycznych jest występowanie prądu upływnościowego. Prądy upływnościowy płynie przez pojemności pasożytnicze silnika między stojanem a korpusem do przewodu ochronnego. Stanowi to utrudnienie przy stosowaniu zabezpieczeń różnicowo-prądowych w napędach przekształtnikowych. Część prądu upływnościowego płynie również przez łożyska maszyny, powodując ich przyspieszoną degradację. Prąd płynący do przewodu PE, który jest prądem składowej zerowej, jest wymuszany przez działanie falownika napięcia [1–3].

Powszechnie stosowane falowniki napięcia z modulacją szerokości impulsów są źródłem składowej zerowej napięcia stanowiącym wymuszenie dla przepływu składowej zerowej prądu. Znajomość i uwzględnienie tego zjawiska jest konieczna do prawidłowego projektowania i instalowania napędów falownikowych. Niekorzystne zjawiska związane z prądami upływnościowymi nasilają się wraz ze wzrostem częstotliwości przełączeń tranzystorów w nowych napędach.

Ochrona silnika przed takimi zjawiskami może odbywać się albo przez odpowiednią konstrukcję silnika, np. stosowanie izolowanych łożysk, albo przez zastosowanie dodatkowych układów elektronicznych kompensujących składową zerową falownika [4]. Jednak takie rozwiązania są trudne do zastosowania w układach przemysłowych, gdyż wymagają ingerencji w konstrukcję silnika lub falownika. Dlatego bardziej praktycznym rozwiązaniem jest zastosowanie odpowiednich filtrów pasywnych [3–5].

Jednym z elementów takich filtrów jest dławik składowej zerowej.

Streszczenie: W artykule przedstawiono zagadnienie praktycznego zastosowania dławika składowej zerowej w układzie napędowym z falownikiem i silnikiem indukcyjnym. Zaprezentowano podstawowy model silnika dla składowej zerowej i wyjaśniono cel zastosowania dławika składowej zerowej. Zaprezentowano wyniki badań zrealizowane w układzie napędowym z silnikiem indukcyjnym 1,5 kW, w którym zastosowano dławik ograniczający prąd upływnościowy maszyny. Uzyskane wyniki uzasadniono na podstawie parametrów schematu zastępczego silnika.

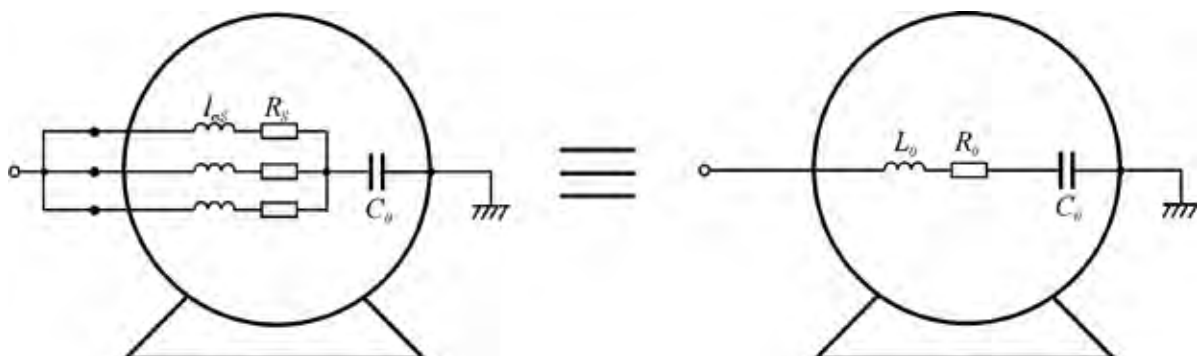
Abstract: The paper presents a solution for practical implementation of common mode (CM) choke in electric drives with induction motor. The motor model with zero sequence component is presented and the purpose of using CM choke is explained. The investigation results for 1,5 kW induction motor drive are given. In the real system the motor leakage current was limited by CM choke use. The obtained results are confirmed with the simulation software analysis.

Model silnika indukcyjnego dla składowej zerowej

Silnik indukcyjny stanowi dla składowej zerowej prądu obwód elektryczny składający się z szeregowo połączonych elementów L_0 , C_0 oraz R_0 – rys. 1.

Pojemność C_0 jest pojemnością pasożytniczą pomiędzy uzwojeniem stojana a metalową obudową silnika. Wielkość pojemności silnika zależna jest od wielkości mechanicznej silnika. Wraz ze wzrostem wielkości silnika pojemność C_0 rośnie. Wartość pojemności C_0 jest rzędu nF.

Parametry L_0 i R_0 są zastępczą indukcyjnością rozproszenia i rezystancją uzwojeń stojana silnika połączonych równolegle. Parametry L_0 , R_0 wyznacza się w obwodzie pomiarowym przed-



Rys. 1. Modele silnika indukcyjnego dla składowej zerowej prądu

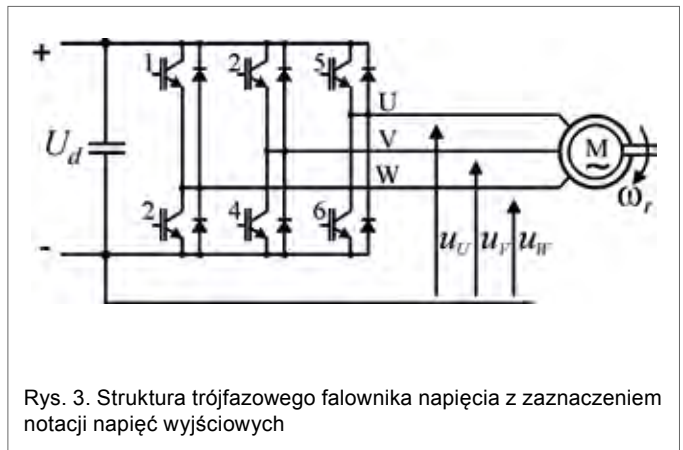
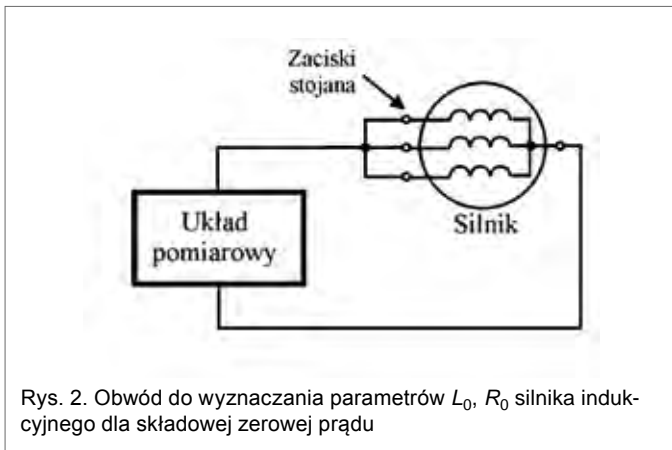


Tabela 1. Parametry silnika 2Sh90L-4 dla składowej zerowej prądu

Parametr	Wartość
L_0	7,1 [mH]
C_0	3,4 [nF]
R_0	1,6 [Ω]

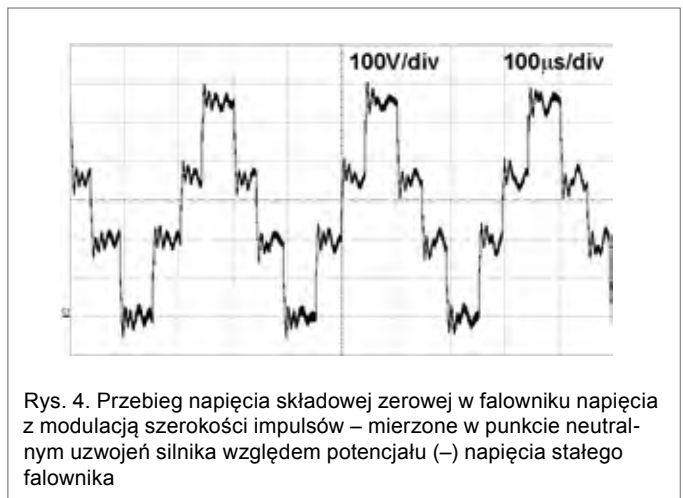
stawionym na rys. 2, natomiast C_0 mierząc pojemność między punktem gwiazdowym silnika a korpusem.

Dane obwodu składowej zerowej dla silnika indukcyjnego typu 2Sh90L-4 o danych znamionowych $P_N = 1,5$ kW, $U_N = 400$ V, $I_N = 3,5$ A, $p = 2$ przedstawiono w tabeli 1.

Falownik napięcia i składowa zerowa

W napędach elektrycznych z silnikiem indukcyjnym zasilanym z falownika napięcia występują prądy upływnościowe, które płyną przez przewód ochronny silnika. Obwód elektryczny prądów upływnościowych zamykają wewnętrzne pojemności pasozytnicze silnika. Prąd upływnościowy jest prądem składowej zerowej. Przepływ tego prądu jest wymuszany przez działanie falownika napięcia, który generuje składową zerową napięcia u_0 .

Analiza struktury (rys. 3) i działania falownika napięcia z modulacją szerokości impulsów pozwalają na wyznaczenie skła-



dowych napięcia wyjściowego falownika dla wszystkich możliwych kombinacji stanów łączników półprzewodnikowych – tabela 2.

Na podstawie analizy tabeli 2 można zauważyć, że w napięciu generowanym przez trójfazowy falownik napięcia występuje niezerowa wartość napięcia u_0 . Przykładowy przebieg napięcia u_0 zarejestrowany w układzie laboratoryjnym przedstawiono na rys. 4.

Tabela 2. Składowe wektorów wyjściowych falownika napięcia (1)

	Numer kombinacji stanów łączników falownika (2)							
	100	110	010	011	001	101	000	111
u_U	U_d	U_d	0	0	0	U_d	0	U_d
u_V	0	U_d	U_d	U_d	0	0	0	U_d
u_W	0	0	0	U_d	U_d	U_d	0	U_d
u_0	$\frac{U_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{2U_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{U_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{2U_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{U_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{2U_d}{\sqrt{3}}$	0	$\sqrt{3}U_d$
u_a	$\frac{\sqrt{2} U_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{U_d}{\sqrt{6}}$	$-\frac{U_d}{\sqrt{3}}$	$-\frac{\sqrt{2} U_d}{\sqrt{3}}$	$-\frac{U_d}{\sqrt{6}}$	$\frac{U_d}{\sqrt{6}}$	0	0
u_b	0	$\frac{U_d}{\sqrt{2}}$	$\frac{U_d}{\sqrt{2}}$	0	$-\frac{U_d}{\sqrt{2}}$	$-\frac{U_d}{\sqrt{2}}$	0	0

(1) Wartości napięć odniesione są do potencjału (-) obwodu wejściowego falownika (rys. 3)

(2) Numery oznaczają: 1 – załączenie, 0 – wyłączenie górnego tranzystora w kolejnych fazach UVW falownika

Składowa zerowa napięcia z rys. 4 została zarejestrowana względem bieguna (–) obwodu napięcia stałego falownika. Częstotliwość impulsowania falownika wynosiła 3,3 kHz. Zarejestrowany przebieg napięcia u_0 jest przebiegiem przemianym o takiej samej częstotliwości. Przebieg u_0 składa się z cyklicznie powtarzających się impulsów napięcia, których niezerowe wartości są równe ok. 190 V, 380 V oraz 570 V. Odpowiada to $\frac{1}{3}U_d$, $\frac{2}{3}U_d$ oraz U_d , gdzie U_d oznacza napięcie stałe falownika. Minimalna i maksymalna wartość napięcia u_0 pojawiają się przy wektorach zerowych, natomiast wartości pośrednie przy wektorach aktywnych.

Obwód prądu składowej zerowej

Zastępczy obwód składowej zerowej prądu napędu silnika indukcyjnego z falownikiem napięcia ma strukturę przedstawioną na rys. 5.

Do celów analizy zjawisk występujące na rys. 5 źródło napięcia u_0 najkorzystniej jest zamodelować jako przebieg przemieniny prostokątnej o amplitudzie $+\frac{1}{2}U_d$ oraz $-\frac{1}{2}U_d$.

Obwód z rys. 5 jest obwodem rezonansowym o częstotliwości drgań własnych:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}} \quad (1)$$

Dla obwodu z rys. 5 i parametrów silnika Sh90L4 częstotliwość rezonansowa to $f_r = 32,5$ kHz.

Na rys. 6 przedstawiono przebieg prądu składowej zerowej zarejestrowany w układzie eksperymentalnym napędu silnika indukcyjnego Sh90L-4 zasilanego z trójfazowego falownika napięcia o częstotliwości modulacji $f_{imp} = 3,3$ kHz.

Prąd i_0 z rys. 6 ma charakter oscylacyjny o częstotliwości ok. 30 kHz wynikającej z drgań własnych obwodu oraz o maksymalnej amplitudzie ok. 150 mA. Dodatkowo występują znaczne impulsy prądu do 1 A związane z przełączeniami tranzystorów. Występujące impulsy prądu stanowią szczególnie niebezpieczeństwo dla łożysk silnika.

Dławik składowej zerowej

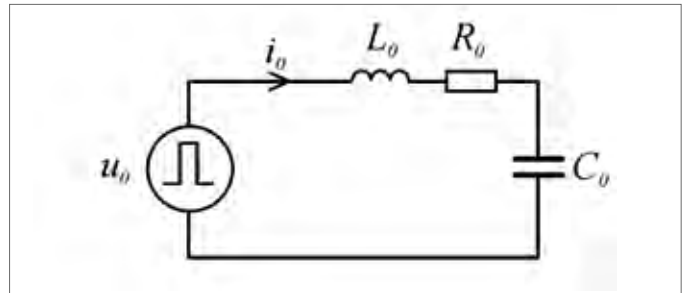
Jednym ze sposobów ograniczenia prądu składowej zerowej w napędach falownikowych jest zastosowanie dławika składowej zerowej (rys. 7).

Dławik składowej zerowej wykonywany jest w postaci trzech symetrycznych uzwojeń nawiniętych na rdzeniu toroidalnym. Dławik taki stanowi pomijalną indukcyjność dla składowych różnicowych z uwagi na bliską zeru wartość wypadkowego strumienia magnetycznego w rdzeniu. Dławik taki stanowi natomiast znaczną indukcyjność dla obwodu składowej zerowej prądu.

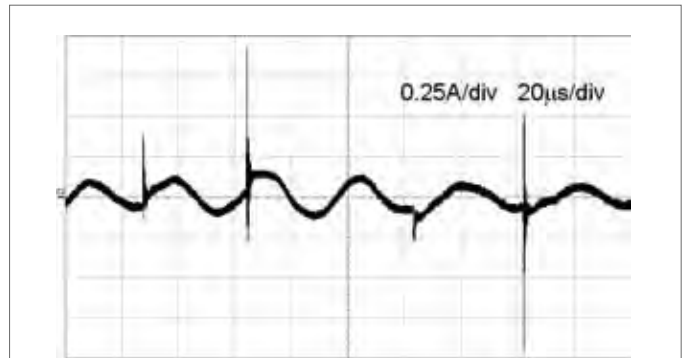
W badanym układzie zastosowano dławik składowej zerowej wykonany na rdzeniu nanokrystalicznym typu MAGNETEC M112 o stałej $AL = 29,6 \mu\text{H}/\text{N}^2$ [7]. Na rdzeniu nawinięto trzy symetryczne uzwojenia po 26 zwojów o indukcyjności 20 mH.

Zastępczy obwód składowej zerowej prądu dla napędu silnika indukcyjnego z falownikiem napięcia oraz dławikiem składowej zerowej ma strukturę przedstawioną na rys. 8.

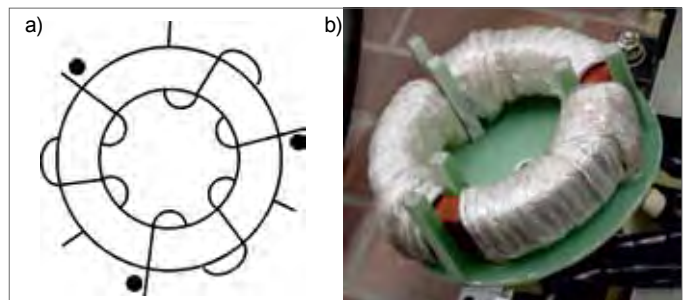
Częstotliwość drgań własnych obwodu z rys. 8 jest następująca:



Rys. 5. Zastępczy obwód składowej zerowej prądu dla falownika i silnika



Rys. 6. Przebieg prądu składowej zerowej i_0 w układzie z silnikiem 2Sh90L-4



Rys. 7. Dławik składowej zerowej dla układu trójfazowego falownika: a) struktura, b) widok

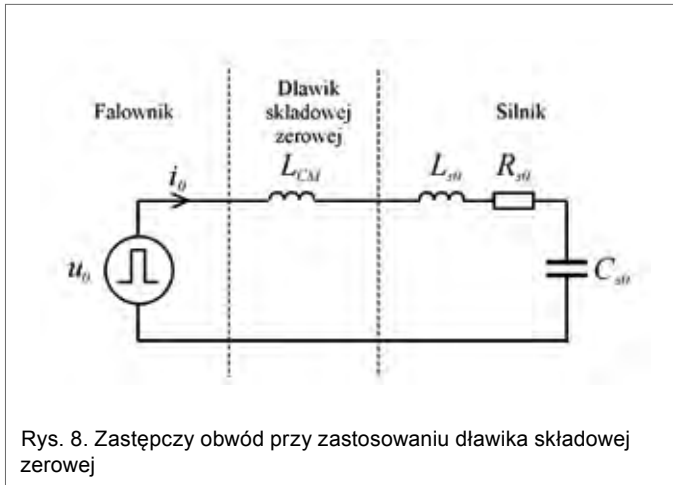
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_0 + L_{CM})C_0}} \quad (2)$$

Na rys. 9 przedstawiono przebieg prądu w przewodzie PE zarejestrowany dla napędu falownikowego silnika indukcyjnego typu 2Sh90L-4 przy zastosowaniu dławika składowej zerowej.

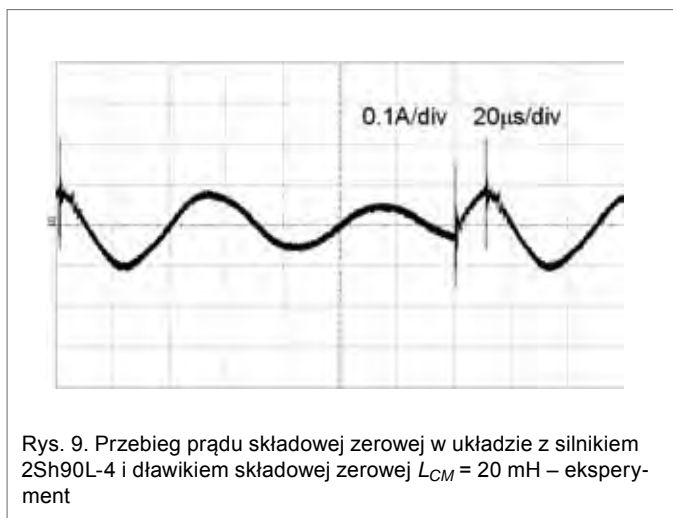
Porównując przebiegi prądu z rysunków 6 i 9, można zauważyć, że włączenie dławika składowej zerowej spowodowało zarówno ograniczenie amplitudy składowej sinusoidalnej prądu do ok. 10 mA, jak również znaczne ograniczenie impulsów prądu do ok. 20 mA. Zmianie uległa częstotliwość drgań własnych obwodu do ok. 16 kHz.

Projektowanie dławika składowej zerowej

Jedną ze znanych metod projektowania filtra składowej zerowej jest oparta na pomiarze napięcia składowej zerowej u_0 , co



reklama



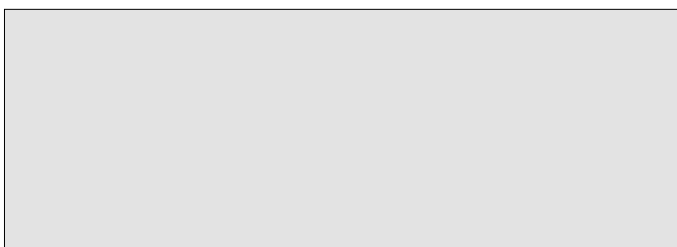
umożliwia określenie strumienia Ψ_{CM} i indukcji B_{CM} w rdzeniu dławika o N_{CM} zwojach i polu przekroju rdzenia S_{cm} [3–6]:

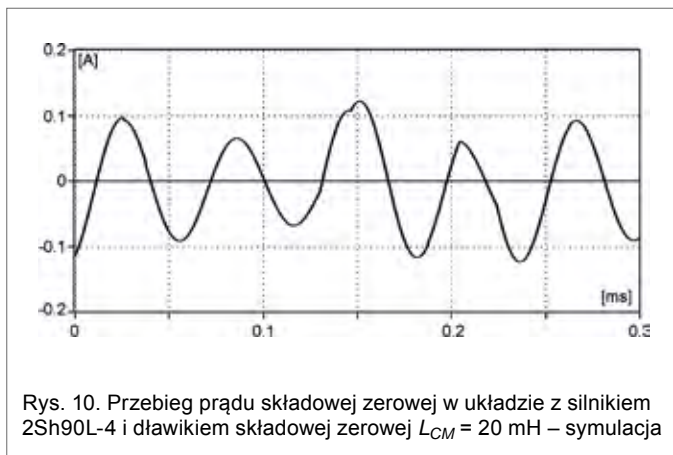
$$\Psi_{CM} = \frac{1}{N_{CM}} \int u_0 dt \quad (3)$$

$$B_{CM} = \frac{\Psi_{CM}}{S_{CM}} = \frac{1}{S_{CM} N_{CM}} \int u_0 dt \quad (4)$$

Obliczona indukcja magnetyczna B_{CM} musi być mniejsza od indukcji magnetycznej nasycenia B_{sat} rdzenia przeznaczonego do wykonania dławika. Producenci materiałów magnetycznych oferują obecnie rdzenie dedykowane dla dławików składowej zerowej o $B_{sat} = 1 \dots 1,2$ T.

reklama





Rys. 10. Przebieg prądu składowej zerowej w układzie z silnikiem 2Sh90L-4 i dławikiem składowej zerowej $L_{CM} = 20$ mH – symulacja

Indukcyjność dławika o znanych wymiarach określona jest zależnością:

$$L_{CM} = \frac{\mu S_{CM} N_{CM}^2}{l_{CM}} \quad (5)$$

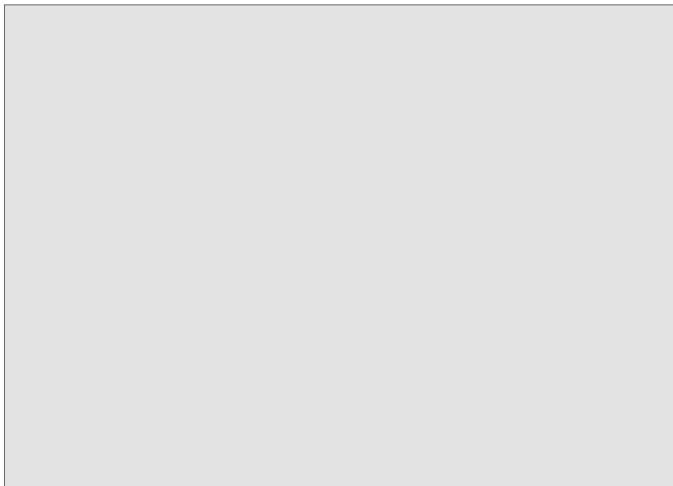
gdzie l_{CM} oznacza średnią drogę strumienia magnetycznego w rdzeniu dławika.

Przy stałym iloczynie $S_{CM} N_{CM}$ wartość szczytowa prądu składowej zerowej $I_{0(max)}$ jest proporcjonalna do stosunku l_{CM}/N_{CM} . Zmniejszenie rozmiarów dławika przez skrócenie drogi strumienia l_{CM} oraz wzrost liczby zwojów N_{CM} powodują jednocześnie korzystne ograniczenie szczytowych wartości prądu $I_{0(max)}$. Jednocześnie należy mieć na uwadze to, czy założona liczba zwojów może zmieścić się w oknie wybranego rdzenia.

Poszukiwanie optymalnego dławika CM w przedstawiony sposób jest kłopotliwym procesem iteracyjnym wymagającym odpowiedniego sprzętu pozwalającego na pomiar u_0 oraz $I_{0(max)}$. Dlatego dla ułatwienia procesu doboru dławika składowej zerowej jest wykorzystanie narzędzi symulacyjnych pozwalających na zamodelowanie obwodu o znanej strukturze dla składowej zerowej – rys. 10.

W przebiegu z rys. 10 widoczne są oscylacje obwodu składowej zerowej prądu, który stanowi obwód rezonansowy o częstotliwości drgań własnych 16,5 kHz. Tłumienie obwodu jest niewielkie z uwagi na małą wartość rezystancji R_0 obwodu.

reklama



Symulacje umożliwiają sprawdzenie, jak zastosowany dławik wpłynie w praktyce na ograniczenie prądu składowej zerowej. W symulacji możliwe jest m.in. określenie kłopotliwych przy pomiarze napięcia u_0 oraz prądu $I_{CM(max)}$.

Podsumowanie

Nowoczesne napędy z falownikami napięcia mogą niekorzystnie wpływać na trwałość silników elektrycznych, powodując przyspieszoną degradację łożysk. Znajomość zjawisk występujących w takich układach napędowych pozwala na zastosowanie odpowiednich technik ochrony. Jednym z takich sposobów ochrony maszyny jest dławik składowej zerowej instalowany na wyjściu falownika.

Zastosowanie dławika wymaga odpowiedniego doboru jego parametrów. Przy doborze dławika konieczna jest znajomość parametrów obwodu napędowego dla składowej zerowej prądu. Są to parametry, które z wystarczającą dokładnością można wyznaczyć za pomocą podstawowej aparatury pomiarowej.

Przy projektowaniu dławika praktycznym rozwiązaniem jest wykorzystanie narzędzi symulacyjnych. Badania symulacyjne obwodu składowej zerowej prądu, będącego obwodem rezonansowym, pozwalają na optymalny wybór indukcyjności dławika zapewniający minimalizację maksymalnych wartości szkodliwego prądu łożyskowego.

Literatura

- [1] DRABIK G.: *Przebiegi SINAMICS S120 w aplikacjach napędowych*. „Napędy i Sterowanie” nr 11, 2008.
- [2] DRAK B., ZIENTEK P.: *Wpływ prądów łożyskowych na uszkodzenia łożysk tocznych silników indukcyjnych dużej mocy*. „Napędy i Sterowanie” nr 12, 2007.
- [3] GUZIŃSKI J., KRZEMIŃSKI Z.: *Filtr wyjściowy falownika napięcia*. Miesięcznik techniczno-informacyjny „Napędy i Sterowanie” nr 4 (75), 2005.
- [4] OGASAWARA S., AKAGI H.: *Modeling and damping of high-frequency leakage currents in PWM inverter-fed ac motor drive systems*. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 22, No. 5, September/October 1996.
- [5] AKAGI H., HASEGAWA H., DOUMOTO T.: *Design and performance of a passive EMI filter for use with a voltage-source PWM inverter having sinusoidal output voltage and zero common-mode voltage*. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 19, No. 4, July 2004.
- [6] SUN Y., ESMAELI A., SUN L.: *A new method to mitigate the adverse effects of PWM inverter*. 1st IEEE Conference on Industrial Electronic and Applications, ICIEA'06, 24–26 maja 2006, Singapur.
- [7] MAGNETEC: COOL BLUE® – Tape wound cores. Dostępny w Internecie: <http://www.coolbluecore.com/magnetec.htm>.

dr inż. Jarosław Guziński – Katedra Automatyki Napędu Elektrycznego, Wydział Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, Gdańsku; e-mail: j.guzinski@ely.pg.gda.pl