

Piotr ZIENTEK

Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych

MODEL SILNIKA INDUKCYJNEGO DO SYMULACJI PASOŻYTNICZYCH ZJAWISK DODATKOWYCH SPOWODOWANYCH ZASILANIEM SILNIKA Z FALOWNIKA PWM

Streszczenie. Artykuł ujmuje 3-fazowy model silnika uwzględniający impedancje pasożytnicze pomiędzy uzwojeniem stojana a rdzeniem stojana i wirnika. Przedstawiono metodę wyznaczania tych impedancji oraz wyniki pomiarów sprawdzających poprawność przyjętego modelu silnika. Porównano wybrane przebiegi otrzymane z układu symulacyjnego i z pomiarów.

MOTOR MODEL FOR SIMULATION OF ADDITIONAL PHENOMENA IN INDUCTION MOTORS SUPPLIED FROM PWM INVERTERS

Summary. In the paper a three-phase motor model with parasitic coupling impedances between the stator winding and the stator and rotor cores is presented. The method for determining these impedances and the results of measurements verifying the motor model are given. The chosen simulation results are compared with those obtained from measurements.

1. WSTĘP

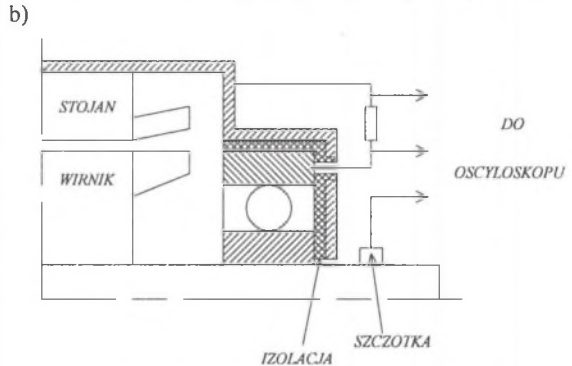
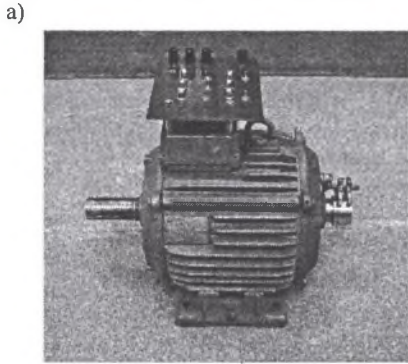
W układach napędowych stosuje się coraz częściej silniki indukcyjne zasilane z falowników o modulowanej szerokości impulsów (PWM). Ich zastosowanie zwiększa skuteczność i wydajność pracy silników indukcyjnych oraz polepsza warunki ich sterowania.

Szybkie przełączanie zaworów w falownikach PWM powoduje jednak powstawanie niekorzystnych zjawisk dodatkowych w silniku indukcyjnym [2, 3, 4, 5, 6]. Zjawiska takie występują w elementach czynnych silnika (rdzenie i uzwojenia) oraz w częściach konstrukcyjnych silnika (korpus, wał, łożyska).

Pojawiające się napięcie pomiędzy wałem silnika a uziomem jest przyczyną powstawania prądu łożyskowego, który uszkadza i niszczy łożysko. Podczas pracy silnika elementy toczone łożyska oddzielone są od pierścieni łożyska filmem olejowym, którego przeciętna grubość zmienia się pomiędzy 0,2 do 2 μm . Film olejowy w łożysku powoduje, że łożysko ma charakter pojemnościowy. W czasie pracy łożyska pojawiają się w nim krótkie wyładowania powodujące krótkotrwały pik prądu uszkadzający łożysko powodując powstanie wżerów i kanałów poprzecznych na bieżniach pierścieni łożyska. Zjawisko to nosi nazwę Elektrycznego Wyładowania Maszynowego (Electric Discharge Machining – EDM) [6]. Prąd łożyskowy będący wynikiem powstania napięcia wałowego jest ograniczony przez impedancję łożyska, która osiąga wartość rzędu $\text{M}\Omega$ przy prędkości obrotowej silnika większej od 1000 obr/min.

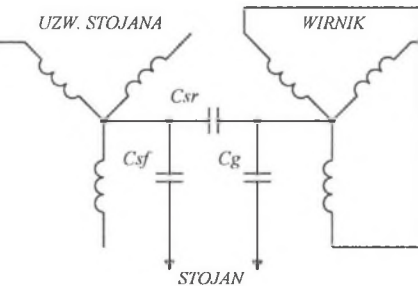
Izolacja pomiędzy uzwojeniem i obwodem magnetycznym stojana oraz fakt, że w czasie pracy silnika wirnik jest praktycznie odizolowany od pozostałych części silnika poprzez film olejowy w łożyskach, powodują, że w silniku powstaje układ sprzężeń pasożytniczych między jego elementami składowymi. W artykule przedstawione zostały dwa modele silnika. Pierwszy z nich będący dużym uproszczeniem uwzględnia wyłącznie sprzężenia pojemnościowe, natomiast drugi model uwzględnia rzeczywiste impedancje pasożytnicze pomiędzy elementami składowymi silnika. Impedancje te nabierają dużego znaczenia przy zasilaniu silników z falowników PWM, bowiem wpływają one w sposób istotny na procesy przejściowe i zjawiska dodatkowe powstające w silniku.

Obiektem badań był silnik o następujących danych znamionowych: $P_N=5,5$ kW, $U_N=220/380$ V, $I_N=20,2/11,7$ A, w którym zastosowano izolację łożysk od korpusu (rys. 1).



Rys. 1. Obiekt badań: a) zmodernizowany silnik, b) konstrukcja pokrywy łożyskowej silnika do pomiarów prądów łożyskowych i napięcia łożyskowego

Fig. 1. Tested object: a) modified motor, b) construction bearing-cover of the motor for measuring bearing currents and bearing voltage



gdzie:

- C_{sf} - pojemność uzwojenia stojana względem korpusu,
- C_{sr} - pojemność uzwojenia stojana względem wirnika,
- C_g - pojemność szczeliny powietrznej,

Rys. 2. Pojemności wewnętrzne w silniku indukcyjnym

Fig. 2. Internal capacitances of the induction motor

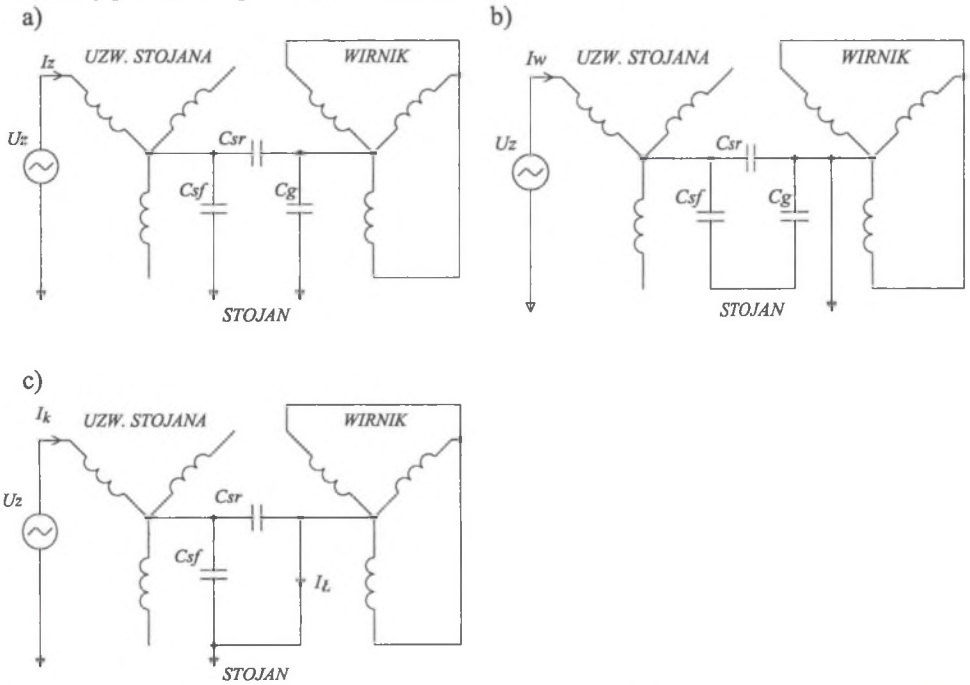
2. POJEMNOŚCI WEWNĘTRZNE W SILNIKU INDUKCYJNYM

Pojemności wewnętrzne silnika mogą być mierzone pomiędzy wybranymi jego punktami. Przyjęto, że w stojanie i w wirniku znajduje się 3-fazowe symetryczne uzwojenie. Na rys. 2 przedstawiono model silnika, w którym uwzględniono pojemności wewnętrzne pomiędzy jego elementami składowymi. Na schemacie tym nie uwzględniono pojemności łożysk, gdyż ich wartości są znacznie mniejsze od pozostałych pojemności wewnętrznych silnika [3]. Ponadto pomiary pojemności wewnętrznych silnika wykonywane są na nieruchomym silniku i istniejący wówczas styk metaliczny pomiędzy elementami łożysk powoduje, że pojemność łożyska jest niemal zerowa.

Pojemności wewnętrzne występujące w silniku zmierzono mostkiem transformatorowym typu: BM484. Wyniki pomiarów są następujące:

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

W celu wywołania w silniku zjawisk podobnych do zjawisk, jakie powoduje napięcie niezrównoważenia (napięcie zakłóceń wspólnych - common mode voltage), przykłada się do jednej fazy nieruchomego silnika napięcie sieciowe, powodując tym samym, że uzwojenie silnika znajduje się pod napięciem względem ziemi. Pod wpływem tego napięcia pomiędzy elementami konstrukcyjnymi silnika a ziemią występują prądy upływowe (prądy zakłóceń wspólnych – common mode current). Pomiar tych prądów pozwala na sprawdzenie poprawności przyjętego modelu silnika uwzględniającego pojemności wewnętrzne (rys. 2). Schematy pomiarowe przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schematy układów do pomiarów prądów upływu w silniku indukcyjnym: a) stojan uziemiony, b) stojan izolowany, wirnik uziemiony, c) stojan i wirnik uziemiony

Fig. 3. Diagrams of circuits for measuring leakage currents in induction motor: a) earthed stator, b) insulated stator, earthed rotor, c) earthed stator and rotor

Z powyższych schematów wynikają następujące zależności na prądy upływowe:

$$\begin{cases} I_z = U_z 2\pi f \left(C_{sf} + \frac{C_{sr} C_g}{C_{sr} + C_g} \right) \\ I_w = U_z 2\pi f \left(C_{sr} + \frac{C_{sf} C_g}{C_{sf} + C_g} \right) \\ I_L = I_k \frac{C_{sr}}{C_{sf} + C_{sr}}, \end{cases} \quad (1)$$

gdzie:

- f – częstotliwość napięcia na zaciskach silnika,
- U_z – wartość napięcia na zaciskach silnika.

Wyniki pomiarów i obliczeń prądów upływu zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1

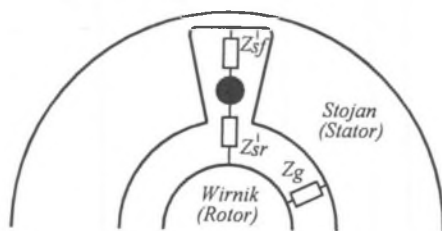
$U_z V$	$I_z \mu A$ stojan uziemiony wirmik izolowany		$I_w \mu A$ wirmik uziemiony stojan izolowany		$I_L \mu A$ stojan i wirmik uziemiony	
	obliczenie	pomiar	obliczenie	pomiar	obliczenie	pomiar
50	56,5	44,5	16,6	15	0,59	0,78
100	113	104	33,3	38,5	1,38	1,60
150	169,6	160	49,9	62,5	2,26	2,73
200	226,2	220	66,6	86,5	2,87	3,75
250	282,7	275	83,3	110	3,67	4,77

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów prądów upływu w silniku indukcyjnym można stwierdzić, że przedstawiony model pojemności wewnętrznych silnika można uznać za poprawny. Różnice w wynikach mogą być spowodowane przyjętymi uproszczeniami w schemacie (rys. 2). W dalszej części artykułu przedstawiony zostanie bardziej rozbudowany model uwzględniający impedancje pasożytnicze pomiędzy uzwojeniami stojana a rdzeniem stojana i wirmika.

3. IMPEDANCJE PASOŻYTNICZE W SILNIKU INDUKCYJNYM

Pasożytnicze sprzężenie pomiędzy uzwojeniami stojana a rdzeniem stojana i wirmika jest często traktowane jako sieć parametrów skupionych. Poniżej przedstawiony zostanie sposób wyznaczenia tych sprzężeń oraz modelowania ich za pomocą elementów R, L, C dla szerokiego zakresu częstotliwości. Wyniki symulacji komputerowej przy wykorzystaniu programu PSpice porównane zostaną z wynikami uzyskanymi pomiarowo.

Na rys. 4 przedstawiono szkic przekroju poprzecznego silnika z jednym przewodem w zębku stojana [7].

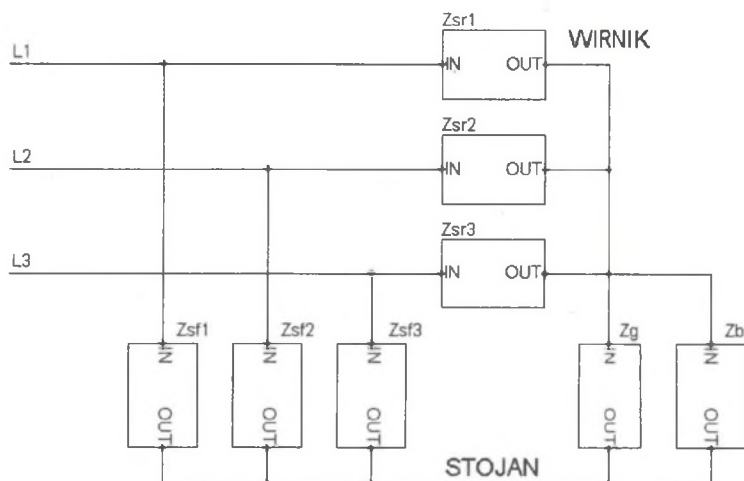


Rys. 4. Uzwojenia silnika wraz z pasożytniczymi sprzężeniami
Fig. 4. Motor windings and associated parasitic linkages

Między tym przewodem a rdzeniem stojana i wirmika występują impedancje pasożytnicze Z_{sf}' oraz Z_{sr}' . W rzeczywistym silniku każde uzwojenie fazowe składa się z wielu impedancji Z_{sf}' i Z_{sr}' . Impedancja szczeliny powietrznej jest reprezentowana jako Z_g i jest ona jedynie pojemnościowa dla badanego silnika wynosi ona 1,41 nF.

Na rys. 5 przedstawiono układ sprzężeń pasożytniczych w silniku indukcyjnym, gdzie:

- Z_{sf} - impedancja pomiędzy 3-fazowym uzwojeniem stojana a jego rdzeniem
- $(Z_{sf1} = Z_{sf2} = Z_{sf3} = Z_{sf})$,
- Z_{sr} - impedancja pomiędzy 3-fazowym uzwojeniem stojana a rdzeniem wirnika
- $(Z_{sr1} = Z_{sr2} = Z_{sr3} = Z_{sr})$,
- Z_g - impedancja szczeliny powietrznej,
- Z_b - impedancja łożyska.



Rys. 5. Układ sprzężeń pasożytniczych w silniku indukcyjnym

Fig. 5. Model of the equivalent diagram of the parasitic linkages

W modelu silnika przyjęto następujące założenia upraszczające [8]:

- pominięto sprzężenia pojemnościowe i indukcyjne między zewzwojami oraz kolejnymi warstwami przewodów w żłobku rdzenia stojana,
- pominięto wpływ prądów wirowych.

Zjawiska falowe w uzwojeniach żłobkowych są bardzo podobne do zjawisk występujących w liniach długich. Traktowanie uzwojeń maszyn elektrycznych jak bezstratnych linii długich jest uproszczeniem, stosowanym jednak często w obliczeniach praktycznych.

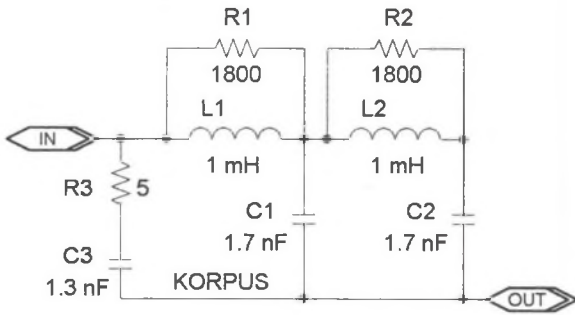
4. WYZNACZENIE IMPEDANCJI PASOŻYTNICZYCH

Impedancje pasożytnicze występujące w modelu symulacyjnym na rys. 5 wyznaczono według zależności podanych w [3, 5, 7], w których wykorzystano wartości impedancji uzyskane podczas badań silnika, w szerokim zakresie częstotliwości od 1 Hz do 2 MHz.

4.1. Wyznaczenie impedancji pasożytniczej Z_{sf}

Pomiar impedancji Z_{sf} wykonywano pomiędzy 3-fazowym uzwojeniem stojana (ze zwartymi końcówkami) a kadłubem silnika przy wyjętym wirniku. Każde uzwojenie fazowe

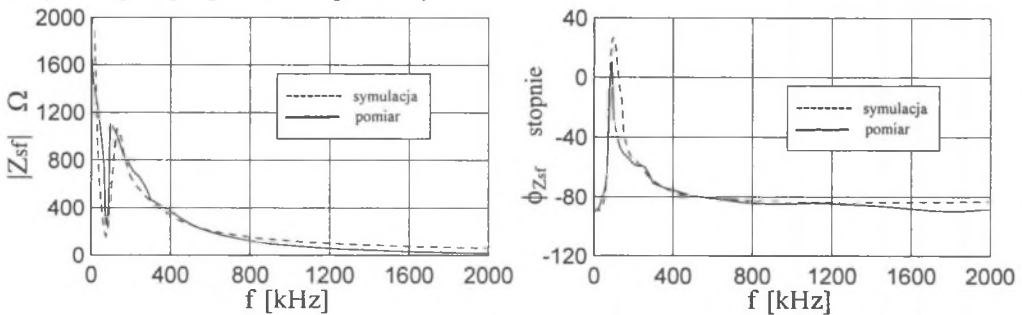
silnika posiada trzy razy większą amplitudę i tę samą fazę co impedancja pomierzona. Rys. 6 przedstawia schemat do wyznaczania impedancji w programie PSpice, dokładnie odzwierciedlającej pomierzone wartości. Indukcyjności L1, L2, rezystory R1, R2 oraz kondensatory C1, C2 w modelu symulacyjnym wpływają decydująco na przebiegi dla małych częstotliwości, natomiast R3 i C3 dla wysokich częstotliwości.



Rys. 6. Schemat impedancji Z_{sf}

Fig. 6. Impedance Z_{sf}

Na rys. 7 przedstawiono amplitudę i fazę impedancji Z_{sf} pomierzonej i uzyskanej w symulacji w programie komputerowym.

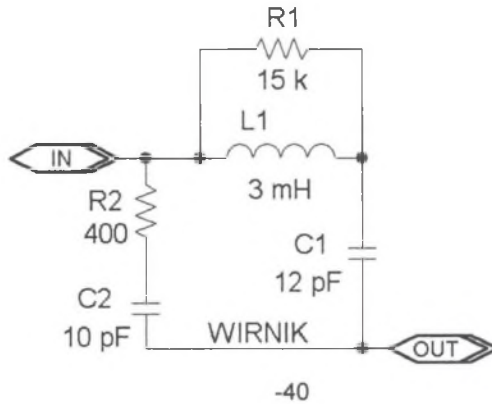


Rys. 7. Amplituda i faza impedancji Z_{sf} z pomiarów i z symulacji komputerowej

Fig. 7. Magnitude and phase of Z_{sf} from measurements and simulation

4.2. Wyznaczenie impedancji pasozytniczej Z_{sr}

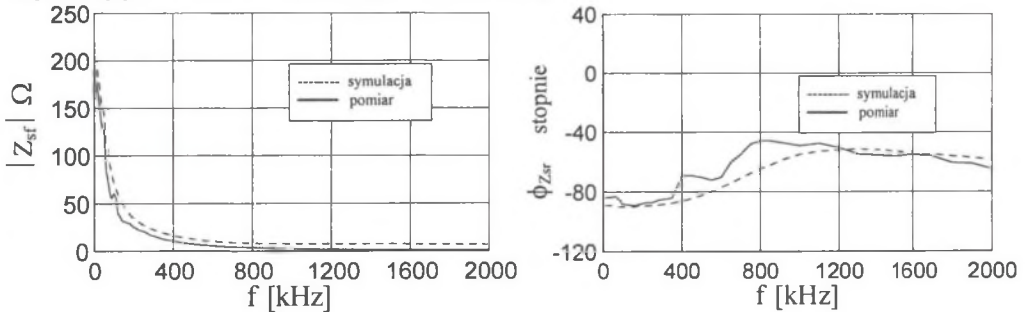
Impedancja ta nie może być wyznaczona bezpośrednio. Może być wyznaczona z poprzednich pomiarów i pomiaru impedancji pomiędzy 3-fazowym uzwojeniem stojana (ze zwartymi końcówkami) a wirnikiem. Model symulacyjny w programie PSpice do wyznaczania impedancji Z_{sr} przedstawiono na rys. 8. Elementy L1, R1, C1, użyte w modelu symulacyjnym wpływają decydująco na przebiegi dla małych częstotliwości, natomiast R2 i C2 dla wysokich częstotliwości.



Rys. 8. Schemat impedancji Z_{sr}

Fig. 8. Impedance Z_{sr}

Na rys. 9 przedstawiono zależność amplitudy i fazy impedancji Z_{sf} od częstotliwości uzyskanej pomiarowo i w symulacji komputerowej.



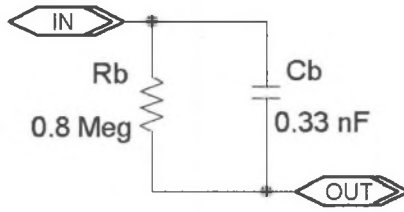
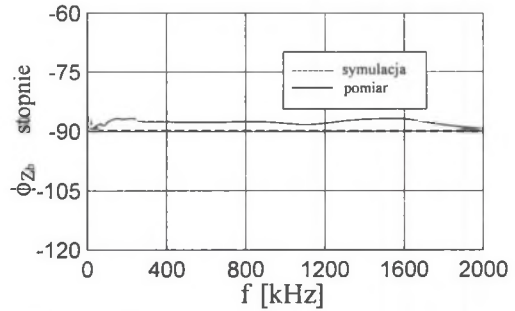
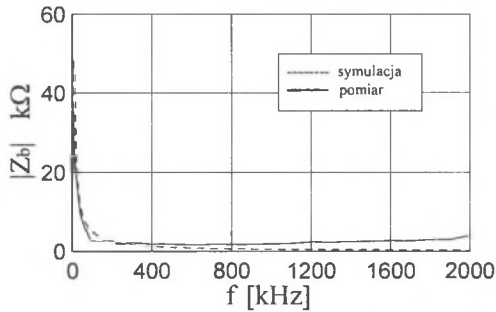
Rys. 9. Amplituda i faza impedancji Z_{sr} z pomiarów i z symulacji komputerowej

Fig. 9. Magnitude and phase of Z_{sr} from measurements and simulation

4.3. Wyznaczenie impedancji łożyska Z_b

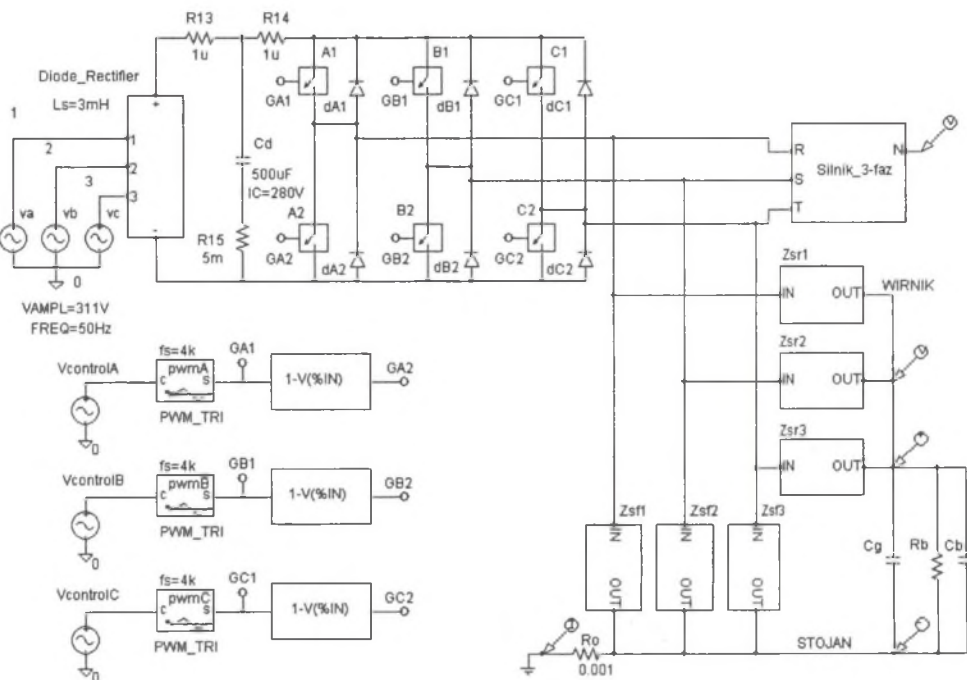
Łożysko zostało zamodelowane jako pojemność połączona równolegle z dużą rezystancją. Przyjęto, że elementy toczne łożyska (kulki) oddzielone są filmem olejowym (o jednakowej grubości) od pierścieni łożyska. Impedancja łożyska jest zależna od wielu czynników: temperatury, prędkości obrotowej silnika, zastosowanego smaru, dlatego pomiary powinny być wykonywane w takich samych warunkach.

Rys. 10 przedstawia schemat impedancji w programie PSpice, dokładnie odzwierciedlającej pomierzone wartości, natomiast na rys. 11 przedstawiono zależność amplitudy i fazy impedancji Z_b od częstotliwości uzyskanej pomiarowo i w symulacji komputerowej.

Rys. 10. Schemat impedancji Z_b Fig. 10. Impedance Z_b Rys. 11. Amplituda i faza impedancji Z_b z pomiarów i z symulacji komputerowejFig. 11. Magnitude of Z_b from measurements and simulation

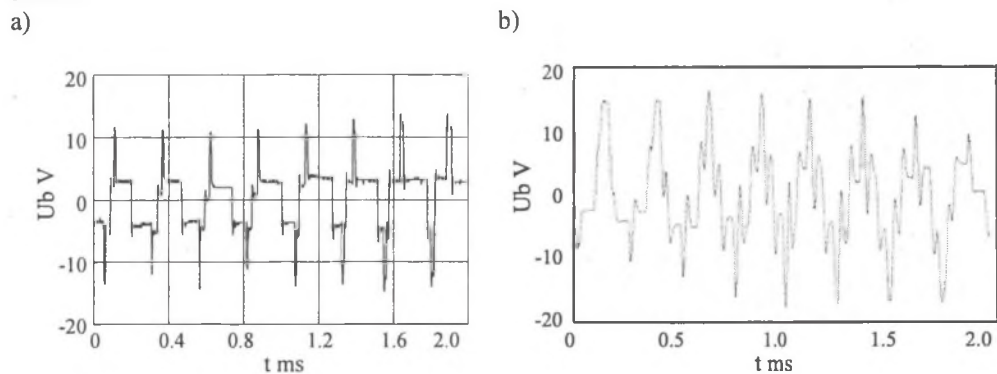
5. SCHEMAT UKŁADU SYMULACYJNEGO

Na rysunku 12 przedstawiono model symulacyjny silnika (wraz z układem zasilania) dla zjawisk dodatkowych używając programu PSpice.

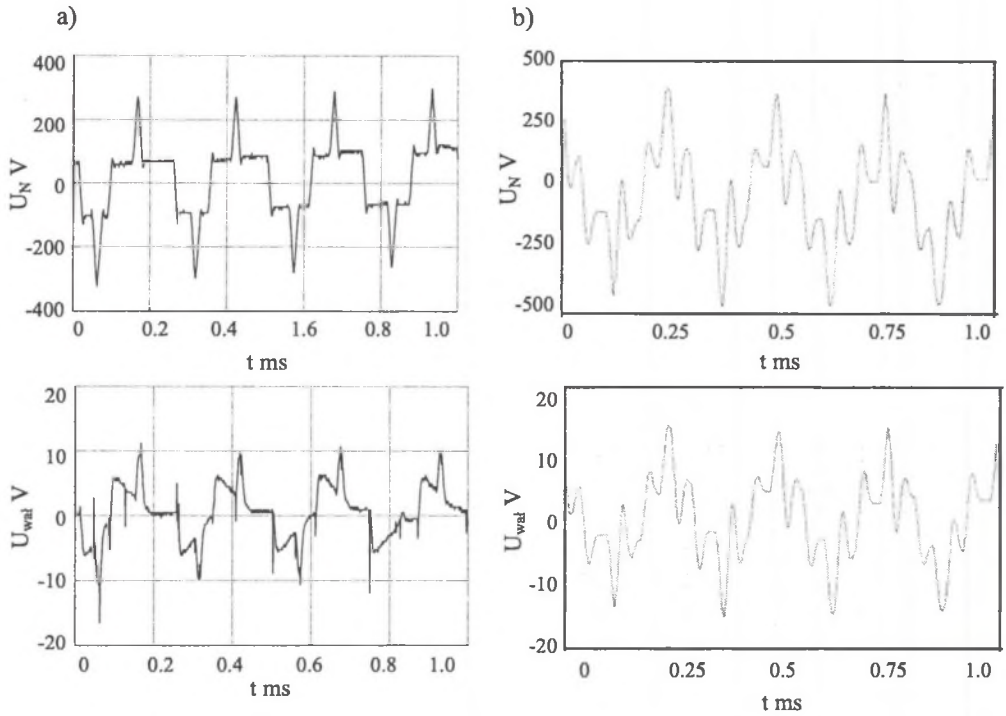


Rys. 12. Model symulacyjny silnika w programie Pspice
 Fig. 12. Simulation model of motor in PSpice

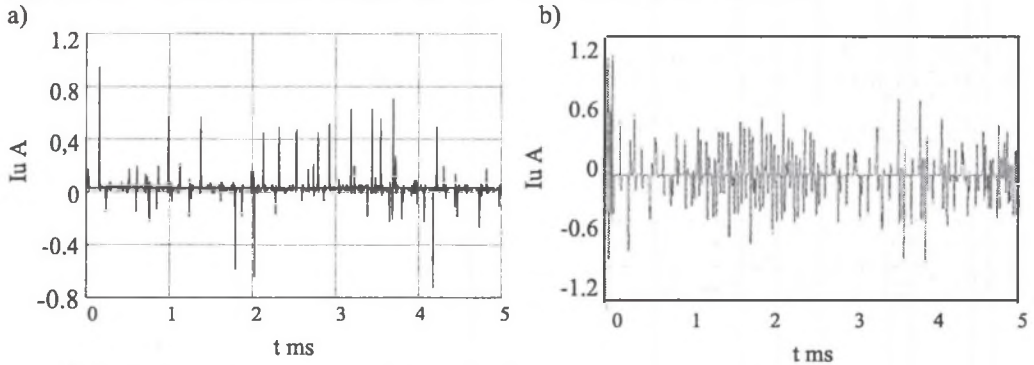
Poniżej na rys. 13-15 przedstawiono przebiegi uzyskane z pomiarów i symulacji komputerowej dla silnika uziemionego, ponieważ jest to najczęściej spotykany stan pracy silnika.



Rys. 13. Napięcie łożyskowe: a) z pomiarów, b) z symulacji
 Fig. 13. Bearing voltage: a) from measurement, b) from simulation



Rys. 14. Napięcie w punkcie neutralnym uzwojenia i napięcie wałowe: a) z pomiarów, b) z symulacji
 Fig. 14. Neutral point and shaft voltages: a) from measurements, b) from simulation



Rys. 15. Prąd uziomu: a) z pomiarów, b) z symulacji
 Fig. 15. Earth current: a) from measurement, b) from simulation

6. WNIOSKI

Porównane wyniki uzyskane na drodze symulacji komputerowych z wynikami pomiarów laboratoryjnych wykazują dużą zbieżność. Zestawione przebiegi czasowe zarejestrowane podczas badań laboratoryjnych z przebiegami będącymi wynikiem symulacji komputerowej świadczą o poprawnym określeniu konfiguracji schematu zastępczego, jak również doboru jego parametrów.

Najważniejsze wyniki badań:

- z pomiarów i z symulacji wynika, że napięcie na wale ma taki sam kształt jak napięcie w punkcie neutralnym uzwojenia stojana,
- z symulacji wynika, że napięcie na wale silnika jest około 27 razy mniejsze od napięcia w punkcie neutralnym uzwojenia stojana, a z pomiarów około 28 razy mniejsze,
- wartości napięcia łożyskowego i prądu uziomu uzyskane na drodze symulacji komputerowej przyjmują wartości zbliżone do wartości uzyskanych z pomiarów laboratoryjnych.

LITERATURA

1. Chen S., Lipo T. A., Fitzgerald D.: Modeling of Motor Bearing Currents in PWM Inverter Drives. IEEE Transactions on Industry Applications Vol.32, No.6, November/December 1996.
2. 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.
3. Busse D., Erdman J., Kerkman R., Schlegel D., Skibinski G.: System Electrical Parameters and Their Effects on Bearing Currents. IEEE Transaction on Industry Applications vol. 33, no. 2, March/April 1997, p. 577-584.
4. 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.
5. Erdman J., Kerkman R., Schlegel D., Skibinski G.: Effect of PWM Inverters on AC Motor Bearing Currents and Shaft Voltages. IEEE Transaction on Industry Applications vol. 32, no. 2, March/April 1996.
6. Rockwell Automation: Inverter-Driven Induction Motors Shaft and Bearing Currents Solutions. 03 March 2002.
7. Naik R., Nondahl T. A.: Distributed parameter circuit model for shaft voltage prediction in induction motors fed by PWM based ac drives. Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting
8. Gacek Z.: Technika wysokich napięć. Skrypty uczelniane Pol. Śl., nr 1830,998, s. 295-297.

Wpłynęło do Redakcji dnia 12 grudnia 2003 r.

Recenzent: Dr hab. Witold Rams

Abstract

The paper introduces a 3-phase motor model including parasitic impedances between the stator winding and the stator and rotor core. The method for determining these impedances and the results of measurements verifying correctness of the assumed motor model are presented. The selected waveforms obtained from simulation and measurements are compared.

In Section 1 the basic parasitic phenomena occurring in inductor motors supplied from PWM inverters are discussed. In Fig.1 testing induction motor is shown.

The three-phase inverter motor model containing internal capacitances between the elements is shown in Fig.2 in Section 2. The Section presents the results of measurements verifying the three-phase inverter motor model. The diagrams of circuits for measuring leakage currents in induction motors are shown in Fig.3. The measurement results and calculation results are tabulated in Table 1.

In Section 3 in Fig.4 the cross section of the motor with one conductor in each stator slot is shown. Fig.5 presents the model of the equivalent diagram including the parasitic impedances of the induction motor.

Section 4 describes the way of determining the induction motor parasitic impedances within the wide range of frequencies. The schematic diagrams for determination of these impedances in PSpice program are given as well. The magnitudes and of the parasitic impedances obtained from measurements and computer simulation are compared.

In Section 5 the simulation model of the motor (with a supply system) for additional phenomena using PSpice program is shown in Fig.12. There are also presented the waveforms obtained from measurements and simulation for the grounded motor.

In Section 6, basing on the measurement results, conclusions regarding the motor model for additional phenomena are formulated.