Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni
Scientific Journal of Gdynia Maritime University

Nr 98/2017, 64–70
ISSN 1644-1818
e-ISSN 2451-2486

BADANIA WSTĘPNE SILNIKA INDUKCYJNEGO W WARUNKACH WAHAŃ NAPIĘCIA Z WYKORZYSTANIEM METOD POLOWYCH

PRELIMINARY STUDY ON INDUCTION MOTOR UNDER VOLTAGE FLUCTUATION BY USING FIELD METHODS

Piotr Gnaciński, Damian Hallmann*
Akademia Morska w Gdyni, Morska 81–87, 81-581 Gdynia, Wydział Elektryczny,
Katedra Elektroenergetyki Okrętowej, e-mail: {p.gnacinski; d.hallmann} @we.am.gdynia.pl
* Adres do korespondencji/Corresponding author

Streszczenie: Artykuł dotyczy wpływu wahań napięcia zasilania na silnik indukcyjny klatkowy. Przedstawiono w nim przebiegi prądu, momentu obrotowego i prędkości obrotowej. Zamieszczono widma napięcia zasilania i prądu pobieranego przez silnik. Odpowiednie eksperymenty numeryczne wykonano za pomocą metody elementów skończonych. Wyniki obliczeń przedstawiono dla silnika indukcyjnego klatkowego o mocy 3 kW.

Słowa kluczowe: jakość napięcia, modelowanie polowe, silnik indukcyjny, subharmoniczne.

Abstract: The paper deals with the influence of supply voltage fluctuations on an induction cage machine. Waveforms of currents, torque and rotational speed are presented. Voltage and current spectrum are discussed. The appropriate numerical experiments were made with finite elements method. The results of calculation are shown for an induction cage motor of rated power 3 kW.

Keywords: voltage quality, field modeling, induction motor, subharmonics.

1. WSTĘP

Wahania napięcia definiuje się jako serie zmian napięcia lub cykliczne zmiany jego obwiedni [*Voltage characteristics*... 2010]. Należy nadmienić, że cykliczne wahania napięcia można traktować jako złożenie interharmonicznych i subharmonicznych [Tennakoon, Perera i Robinson 2008]. Podstawowymi źródłami wahań napięcia są głównie odbiorniki wielkich mocy, przede wszystkim tzw. odbiorniki niespokojne [Hanzelka 2001; Sürgevil i Akpnar 2009], jak np. piece łukowe [Hanzelka 2001], napędy elektryczne dużej mocy, napędy walcownicze, maszyny ciągowe [Hanzelka 2001]. Innymi przyczynami wahań napięcia mogą być również procesy łączeniowe baterii kondensatorów, nieprawidłowości w pracy przełącznika

zaczepów transformatora, rozruchy silników asynchronicznych, spawarki elektryczne, bojlery, piły i młoty elektryczne, pompy i kompensatory, windy, dźwigi i inne [Yılmaz, Ermis i Cadırcı 2012; Deokar, Waghmare i Jadhav 2010; Bolen i Gu 2006]. W niektórych systemach źródłem wahań może być również oświetlenie fluorescencyjne [Otomański 2010]. W systemach okrętowych wahania napięcia mogą być spowodowane pracą odbiorników dużych mocy, których moc jest zbliżona do mocy zainstalowanych prądnic [Mindykowski 2016]. Uogólniając, można stwierdzić, że głównymi przyczynami wahań napięcia są odbiorniki o zmiennym obciążeniu, których moc jest znacząca w stosunku do mocy zwarcia w punkcie ich przełączenia do systemu zasilającego.

Wahania napięcia, subharmoniczne oraz interharmoniczne powodują m.in. wzrost wartości skutecznej prądu pobieranego przez silnik, wzrost strat mocy, temperatury uzwojeń oraz wahania momentu obrotowego i temperatury uzwojeń [Gallo i in. 2004; Pepliński 2014; Gnaciński i Pepliński 2014]. Powyższe zjawiska były badane głównie za pomocą metod obwodowych i doświadczalnych [Pepliński 2014; Gnaciński i Pepliński 2014; Abreu de Emanuel 2002]. Również w pracy [Gnaciński i Pepliński 2012] zamieszczono wstępne wyniki badań eksperymentalnych dotyczących wpływu wahań napięcia na prąd i temperaturę uzwojeń silnika.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki obliczeń polowych prądu, przebiegu prędkości obrotowej oraz momentu obrotowego silnika w warunkach prostokątnej modulacji napięcia.

2. OPIS MODELU

Prezentowane wyniki badań dotyczą silnika indukcyjnego klatkowego typu TSg 100L-4B, o mocy znamionowej 3 kW, napięciu znamionowym 380 V, prądzie znamionowym 6,9 A i prędkości znamionowej 1415 obr/min. Silnik ten ma uzwojenia połączone w trójkąt. Wstępny model omawianego silnika został zrealizowany w środowisku ANSYS Maxwell.

Ogólne równanie pola magnetycznego zależnego od czasu i uwzględniające takie zjawiska, jak ruch ośrodka czy obecność magnesów trwałych wykorzystywane przez ANSYS Maxwell, ma następującą postać [ANSYS *technical documentation*]:

$$\nabla \times \upsilon \, \nabla \times A = J_s - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \nabla V + \nabla \times H_c + \sigma v \times \nabla \times A \tag{1}$$

gdzie:

H_c – koercja magnesu trwałego,
v – prędkość części ruchomych,
A – wektorowy potencjał magnetyczny,
V – potencjał elektryczny,
υ – reluktywność,
J_s – gęstość prądu źródła.

Z kolei dynamikę ruchu obrotowego opisuje równanie (2) [ANSYS *technical documentation*]:

$$J\beta + \lambda\omega = M_e - M_{op} \tag{2}$$

gdzie:

J – moment bezwładności,
ω – prędkość chwilowa kątowa,
M_e – moment elektromagnetyczny,
M_{op} – moment oporowy,
β – przyspieszenie kątowe,
λ – współczynnik tłumienia.

Model silnika został wykonany w układzie kartezjańskim. Jest modelem dwuwymiarowym, sporządzonym dla połowy silnika (w celu zmniejszenia czasu obliczeń). Do modelu utworzono siatkę, która ma około 6000 elementów.

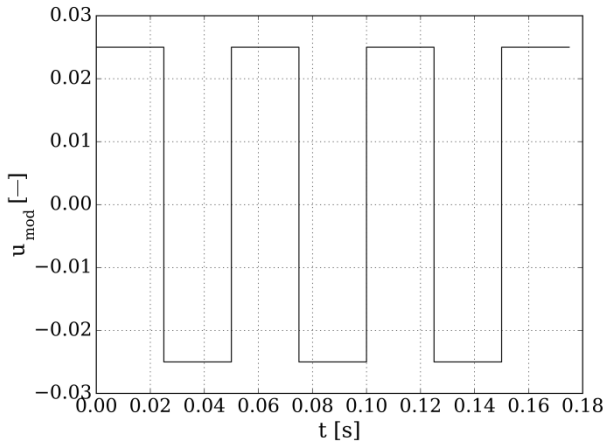
Dla celów obliczeń przyjęto, że silnik jest zasilany z układu trzech idealnych napięć sinusoidalnych $e_a(t)$, $e_b(t)$, $e_c(t)$, na które nałożono sygnał modulujący. Sygnał modulujący jest przebiegiem prostokątnym o okresie 0,05 s oraz amplitudzie równej 0,025 U_{MAX} (rys. 1). Napięcia zasilania można opisać za pomocą wzorów (3, 4, 5):

$$e_a(t) = U_{\max} \cdot \sin(2\pi \cdot 50 \cdot t) \cdot (1 + u_{\mathrm{mod}}(t)) \tag{3}$$

$$e_b(t) = U_{\max} \cdot \sin(2\pi \cdot 50 \cdot t - \frac{2}{3}\pi) \cdot (1 + u_{\mathrm{mod}}(t)) \tag{4}$$

$$e_c(t) = U_{\max} \cdot \sin(2\pi \cdot 50 \cdot t - \frac{4}{3}\pi) \cdot (1 + u_{\mathrm{mod}}(t)) \tag{5}$$

gdzie u_{mod} – sygnał modulujący.



Rys. 1. Przebieg sygnału modulującego

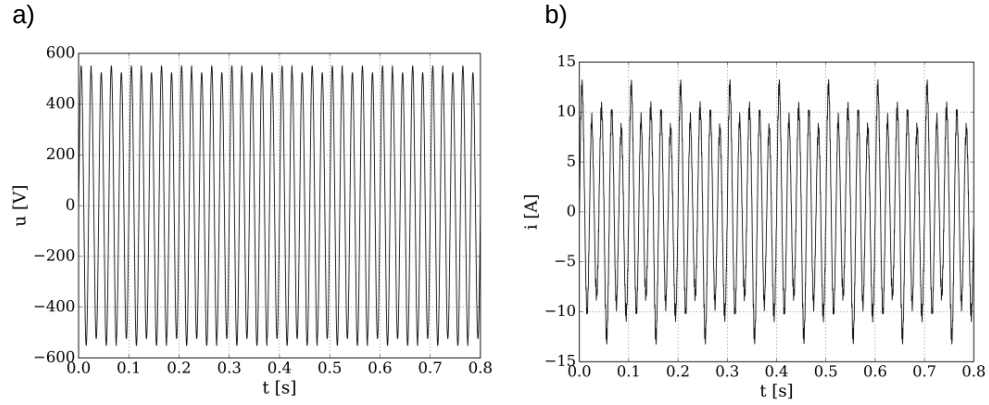
Fig. 1. *Waveform of modulating signal*

Obliczenia polowe wykonano za pomocą metody elementów skończonych, natomiast analizę wyników obliczeń (np. analizę widmową) zgodnie z normą IEC 61000-4-7 [IEC Standard 61000-4-7].

3. WYNIKI OBLICZEŃ

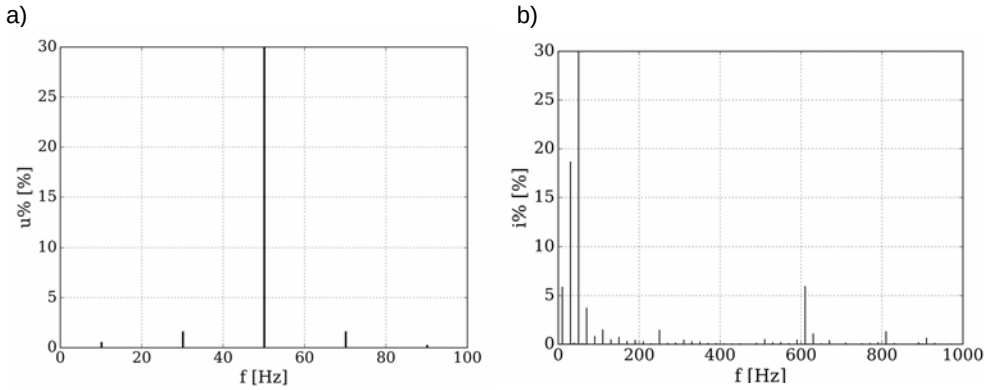
Obliczenia wykonano dla momentu znamionowego obciążenia oraz napięcia modulującego o amplitudzie 2,5% wartości maksymalnej. Wyniki prezentowane w pracy obliczono dla stanu ustalonego. Moment bezwładności przyjęty do obliczeń jest sumą momentów bezwładności silnika i prądnicy obciążającej.

Na rysunku 2 przedstawiono przebiegi napięcia zasilania oraz prądu pobieranego przez silnik. Ich widma zamieszczono na rysunku 3. Widmo napięcia zawiera subharmoniczne o częstotliwościach 10 Hz i 30 Hz oraz interharmoniczną o częstotliwościach 70 Hz oraz wartościach odpowiednio 0,5, 1,6 i 1,6% składowej podstawowej. Widmo prądu silnika zawiera subharmoniczne o częstotliwości 10 Hz i wartości 6% składowej podstawowej (I_1) oraz o częstotliwości 30 Hz i wartości 18% I_1. Widmo to ma również interharmoniczną o częstotliwości 70 Hz i wartości 3,7% I_1 oraz o częstotliwości 610 Hz i wartości 5,9% I_1. Należy podkreślić, że powyższe subharmoniczne i interharmoniczne nie występują przy zasilaniu znamionowym (bez modulacji) Warto również nadmienić, że modulacja napięcia spowodowała wzrost wartości skutecznej prądu (uśrednionej dla okresu modulacji) o około 5% w stosunku do zasilania znamionowego.



Rys. 2. Przebieg: a) napięcia międzyfazowego, b) prądu przewodowego

Fig. 2. *Waveform: a) of the line voltage, b) the line current*

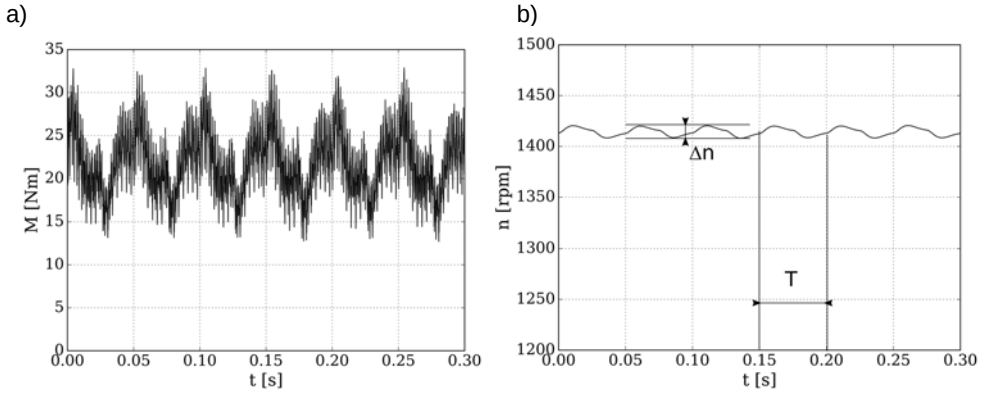


Rys. 3. Widmo: a) napięcia międzyfazowego, b) prądu przewodowego

Fig. 3. *Spectrum: a) of the line voltage, b) the line current*

Na rysunku 4 przedstawiono przebiegi momentu obrotowego oraz prędkości obrotowej. Modulacja napięcia spowodowała wahania momentu w zakresie od około 12 Nm do 33 Nm. Wahaniom momentu towarzyszyły wahania prędkości obrotowej silnika o amplitudzie Δn = 12,5 obr/min i okresie T = 0,05 s, tj. równym okresowi modulacji.

Prezentowane wyniki obliczeń mogą być przydatne przy analizie wpływu wahań napięcia na obciążenia cieplne oraz drgania silnika indukcyjnego.



Rys. 4. Przebieg: a) momentu obrotowego, b) prędkości obrotowej chwilowej silnika

Fig. 4. *Torque: a) curve, b) the transient rotational speed of the motor*

4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wstępne wyniki obliczeń polowych silnika indukcyjnego w warunkach wahania napięcia zasilania. W ramach dalszych prac badawczych zaplanowano sprzężenie modelu elektromagnetycznego z modelem cieplnym oraz analizę wpływu wahań napięcia na temperaturę uzwojeń, a także drgania silnika. Ponadto przewidziano porównanie wyników obliczeń z wynikami pomiarów.

LITERATURA

Abreu de, J.P.G., Emanuel, A.E, 2002, *Induction Motor Thermal Aging Caused by Voltage Distortion and Imbalance, Loss of Useful Life and Its Estimated Cost*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, no. 1, s. 12–20.

ANSYS *technical documentation*, http://www.ansys.com.

Bolen, M.H.J., Gu, I.Y.H., 2006, *Signal Processing of Power Quality Disturbances*, Wiley, New York.

Deokar, S.A., Waghmare, L., Jadhav, G.N., 2010, *Voltage Flicker Assessment of Induction Motors Used in the Integrated Water Pumping Station*, Proc. of Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) & 2010 Power India, New Delhi, December 20–23.

Gallo, D., Langella, R., Testa, A., Emanuel, A., 2004, *On the Effects of Voltage Subharmonics on Power Transformers: a Preliminary Study*, 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHPQ, s. 501–506.

Gnaciński, P., Pepliński, M., 2012, *Wpływ wahań napięcia na obciążenia cieplne silnika indukcyjnego – badania wstępne*, vol. 66, t. 2, nr 32, s. 288–293.

Gnaciński, P., Pepliński, M., 2014, *Induction Cage Machine Supplied with Voltage Containing Subharmonics and Interharmonics*, IET Electric Power Applications, vol. 8, no. 8, s. 287–295.

Hanzelka, Z., 2001, *Jakość energii elektrycznej. Wahania napięcia*, http://twelvee.com.pl/pdf/Hanzelka/cz_3_pelna.pdf.

IEC Standard 61000-4-7, *General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Measuring Instruments for Power Supply Networks and Attached Devices Used for the Measurements.*

Mindykowski, J., 2016, *Case Study – Based Overview of Some Contemporary Challenges to Power Quality in Ship Systems*, Inventions, 1(2), 12.

Otomański, P., *Wpływ wahań napięcia na wybrane źródła promieniowania optycznego*, 2010, R. 56, nr 9, s. 1077–1080.

Pepliński, M., *Wpływ subharmonicznych i interharmonicznych napięcia na prądy i temperaturę uzwojeń silników indukcyjnych małych mocy*, 2014, rozprawa doktorska, Akademia Morska w Gdyni.

Sürgevil, T., Akpnar, E., 2009, *Effects of Electric Arc Furnace Loads on Synchronous Generators and Asynchronous Motors*, Proc. of International Conference on Electrical and Electronics Engineering ELECO 2009, Bursa, November 5–8, s. I-49–I-53.

Tennakoon, S., Perera, S., Robinson, D., 2008, *Flicker Attenuation – Part I, Response of Three-Phase Induction Motors to Regular Voltage Fluctuations*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, no. 2, s. 1207–1214.

Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems, 2010, EN 50160.

Yılmaz, I., Ermis, M., Cadırcı, I., 2012, *Medium-Frequency Induction Melting Furnace as a Load on the Power System*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 48, no. 4, s. 1203–1214.