

Piotr Gnaciński, Damian Hallmann
Akademia Morska w Gdyni

BADANIA WSTĘPNE SILNIKA INDUKCYJNEGO ZASILANEGO NAPIĘCIEM ZAWIERAJĄCYM SUBHARMONICZNE Z WYKORZYSTANIEM METOD POŁOWYCH

PRELIMINARY INVESTIGATION OF AN INDUCTION MOTOR SUPPLIED WITH VOLTAGE CONTAINING SUBHARMONICS USING FIELD METHODS

Streszczenie: Artykuł dotyczy wpływu subharmonicznego napięcia na prądy uzwojeń stojana i prędkość obrotową silnika indukcyjnego klatkowego. Badania wstępne wykonano za pomocą modelu 2D zaimplementowanego w środowisku Ansoft Maxwell. Wyniki obliczeń przedstawiono dla silnika indukcyjnego o mocy 3 kW, połączonego w trójkąt.

Abstract: This paper deals with the effect of voltage subharmonics on stator windings currents and rotational speed of an induction cage machine. The preliminary investigations were carried out with 2D machine model implemented in Ansoft Maxwell environment. The results of calculation are presented for a delta-connected machine of the rated power 3 kW.

Słowa kluczowe: maszyny indukcyjne, subharmoniczne, interharmoniczne, jakość napięcia, model polowy
Keywords: induction machines, subharmonics, interharmonics, power quality, field model

1. Wstęp

Na silniki indukcyjne zasilane z sieci zazwyczaj jednocześnie oddziałują różne zaburzenia jakości napięcia, takie jak: odchylenia napięcia od wartości znamionowej, asymetria napięcia oraz odkształcenia krzywej jego przebiegu, związane z występowaniem wyższych harmonicznych, interharmonicznych oraz subharmonicznych (podsynchronicznych interharmonicznych) – składowych napięcia o częstotliwości niższej od harmonicznej podstawowej. Zaburzenia jakości napięcia powodują wzrost strat mocy w silniku, zwiększenie temperatury uzwojeń, przyspieszone starzenie cieplne układu izolacyjnego oraz zmniejszenie obciążalności silnika [1-6].

Szczególnie szkodliwym, a jednocześnie słabo zbadanym zaburzeniem jakości napięcia są subharmoniczne. Przyczyną ich występowania są zmiany obciążenia odbiorników, praca odbiorników nieliniowych i elektrowni wiatrowych [7-15]. Wpływ rozważanych zaburzeń na silnik indukcyjny badano głównie za pomocą metod obliczeniowych [1-3,11,16,17], rzadziej metodami eksperymentalnymi [2-4,17]. Należy podkreślić, że dotychczas dla celów modelowania silnika indukcyjnego zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne wykorzystywano wyłącznie metody obwodowe. Odpowiednie

modele obwodowe silnika są oparte na schemacie zastępczym typu T oraz na transformacji d-q. Metoda oparta o schemat zastępczy typu T jest dosyć powszechnie stosowana w pracach badawczych dotyczących rozważanej problematyki [1-3,16,17]. Umożliwia stosunkowo dokładne [2,3] obliczenie subharmonicznego prądu za wyjątkiem subharmonicznych o częstotliwości zbliżonej do częstotliwości składowej podstawowej [2,3]. Wadą rozważanej metody jest pominięcie wahań prędkości obrotowej wału, których skutkiem jest między innymi przepływ dodatkowych składowych interharmonicznych [2,3,11]. Wahania prędkości obrotowej i związane z nimi zjawiska uwzględnia metoda oparta na transformacji d-q [2,3,11], jednak jej zastosowanie jest ograniczone do subharmonicznych o częstotliwości zbliżonej do harmonicznej podstawowej [2,3]. Dla częstotliwości znacznie mniejszych od częstotliwości składowej podstawowej zastosowanie rozważanej metody może prowadzić do znaczących błędów obliczeniowych [2,3].

Należy również nadmienić, że żadna z powyższych metod nie daje możliwości obliczenia wzrostu składowej podstawowej prądu magnetycznego w silniku zasilanym napięciem zawierającym subharmoniczne. Jednocześnie, jak wykazały badania prezentowane w [2,3], jej pominięcie może prowadzić do znaczących

błędów przy analizie cieplnej silnika indukcyjnego mocno nasyconego. W celu zwiększenia dokładności obliczania temperatury uzwojeń w [2,3] uwzględniono wspomniany wzrost za pomocą modelu typu *czarna skrzynka*. Należy jednak zauważyć, że jego identyfikacja wiąże się z bardzo dużym nakładem pracy [2], a zastosowanie jest w znacznym stopniu ograniczone [2,3].

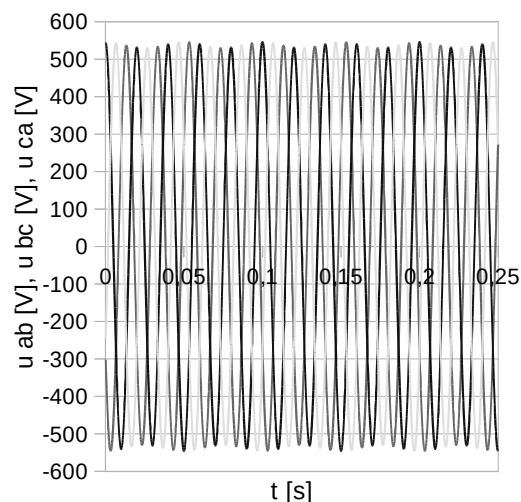
Podsumowując, dotychczas wpływ subharmonicznych napięcia na silnik indukcyjny modelowano wyłącznie za pomocą metod obwodowych. Ich zastosowanie do analizy rozważanego zagadnienia wiąże się z licznymi ograniczeniami. W niniejszym artykule przedstawiono wstępne wyniki badań metodą połową silnika indukcyjnego zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne.

3. Wstępne wyniki badań

Obiektem badań jest silnik indukcyjny klatkowy typu TSg100L-4B o mocy 3 kW, napięciu znamionowym $U_N = 380$ V, prądzie znamionowym $I_N = 6,9$ A, prędkości znamionowej $n_N = 1415$ obr/min, połączony w trójkąt. Wstępny model badanego silnika zaimplementowano w środowisku Ansoft Maxwell – Maxwell 2D.

Przykładowe wyniki symulacji z wykorzystaniem modelu wstępnego zamieszczono na rys. 1 – 4. Obliczenia wykonano dla momentu bezwładności $J = 0,082$ kg m² tj. dziesięciokrotnie większego od momentu bezwładności silnika oraz dla momentu obciążenia równego 0,8 Nm – tj. ok. 4% momentu znamionowego. Uwzględniono przypadek zasilania napięciem sinusoidalnym (bez subharmonicznej) oraz zawierającym subharmoniczną o amplitudzie równej 1,5%.

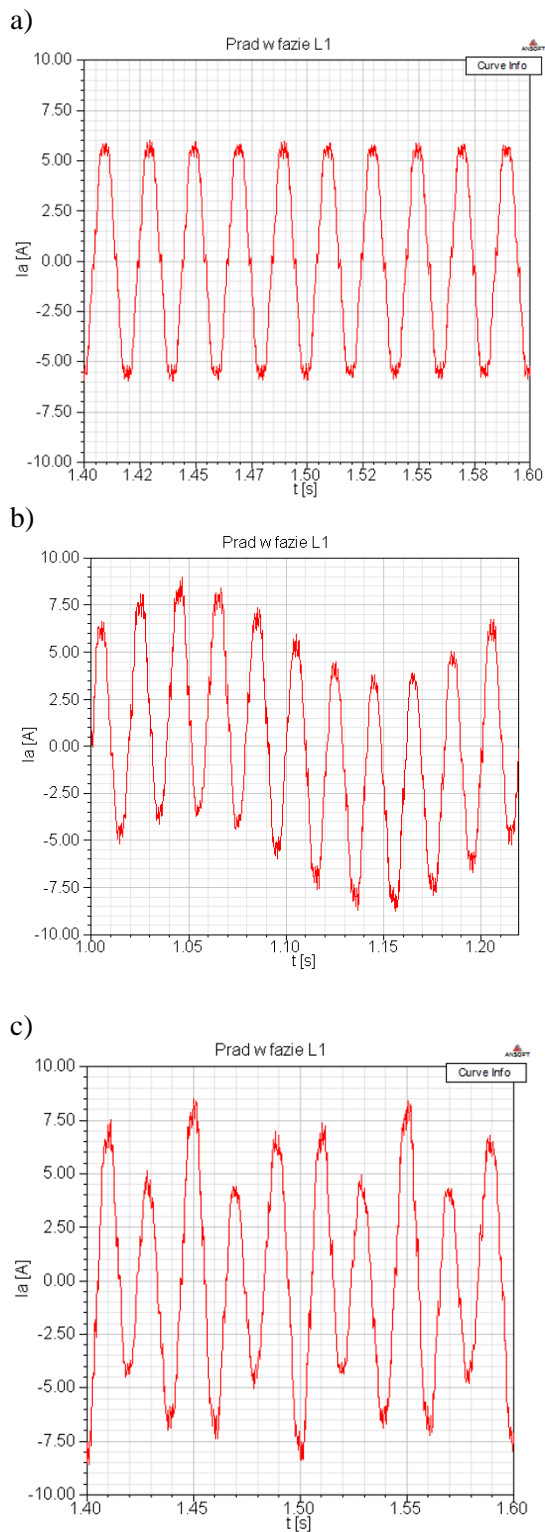
Przebieg napięcia testowego zawierającego subharmoniczną o częstotliwości $f_{sh}=30$ Hz przedstawiono na rys. 1. Na rys. 2 zamieszczono przebieg prądu w linii zasilającej dla napięcia sinusoidalnego (rys. 2a) oraz zawierającego subharmoniczną o częstotliwości $f_{sh}=5$ Hz (rys. 2b) oraz $f_{sh}=30$ Hz (rys. 2c). Widma badanych przebiegów przedstawiono na rys. 3. Dla zasilania sinusoidalnego (rys. 3a) widmo prądu zawiera oprócz harmonicznej podstawowej i wyższych harmonicznych niewielkie subharmoniczne i interharmoniczne związane ze skomplikowanym kształtem geometrycznym obwodu magnetycznego.



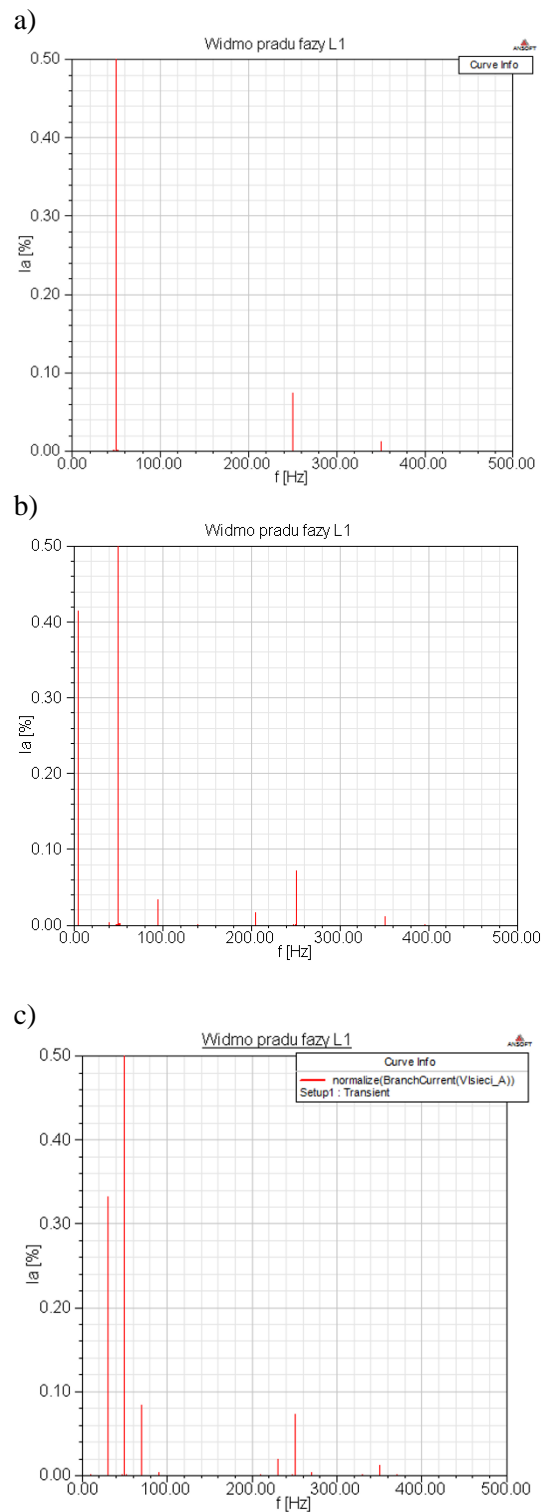
Rys. 1. Przebiegi napięcia międzyfazowego zawierającego subharmoniczną o częstotliwości 30 Hz i amplitudzie równej 1,5% amplitudy składowej podstawowej.

Z kolei zasilanie napięciem zawierającym subharmoniczną powoduje przepływ subharmonicznych prądu o amplitudzie ok. 40% i 13% amplitudy składowej podstawowej, odpowiednio dla subharmonicznej o częstotliwości $f_{sh}=5$ Hz (rys. 3b) oraz $f_{sh}=30$ Hz (rys. 3c). Ponadto, subharmonicznym prądowi towarzyszyły interharmoniczne napięcia. Jak już wspomniano, przepływ interharmonicznych prądu w silniku indukcyjnym zasilanym napięciem zawierającym subharmoniczne jest zgodny z wynikami obliczeń metodami obwodowymi [2,311] oraz badaniami eksperymentalnymi [2,3]. Rozważane zjawisko jest spowodowane przede wszystkim przez wahania prędkości obrotowej silnika [11]. Przykładowe przebiegi prędkości obrotowej badanego silnika dla subharmonicznej o częstotliwości $f_{sh}=5$ Hz zamieszczono na rys. 4. Dla porównania, na tym samym rysunku przedstawiono przebieg prędkości obrotowej dla zasilania napięciem niezawierającym subharmonicznej.

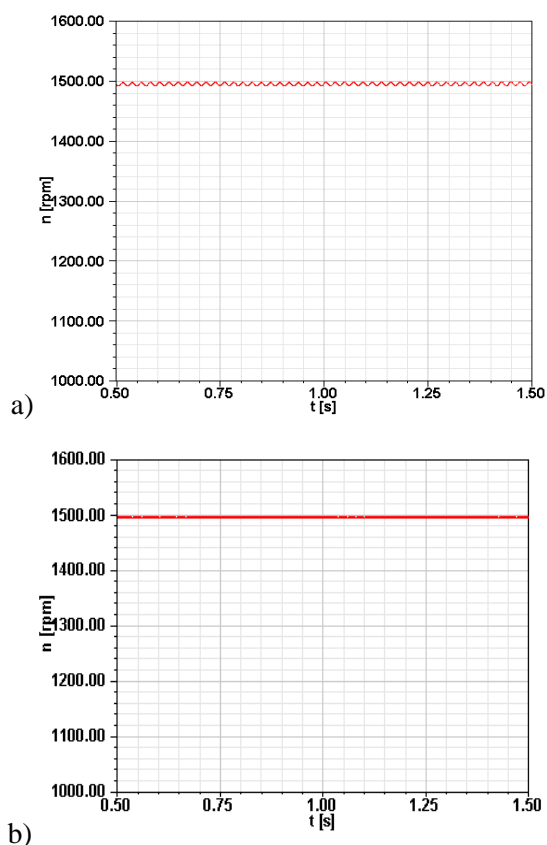
Należy podkreślić, że za pomocą dotychczas stosowanych metod obwodowych nie było możliwości analizy wahań prędkości obrotowej dla tak niskiej częstotliwości subharmonicznych. W modelu opartym o schemat zastępczy typu T [1-3,16,17] wahania prędkości obrotowej były pomijane. Z kolei metoda wykorzystująca transformacje d-q [2,3,11] jest odpowiednia tylko dla subharmonicznych o częstotliwości zbliżonej do częstotliwości składowej podstawowej [2,3].



Rys. 2. Przebiegi prądu pobieranego przez silnik: a) dla zasilania napięciem sinusoidalnym, b) dla zasilania napięciem zawierającym subharmoniczną o częstotliwości 5 Hz, c) dla zasilania napięciem zawierającym subharmoniczną o częstotliwości 30 Hz.



Rys. 3. Widmo prądu pobieranego przez silnik: a) dla zasilania napięciem sinusoidalnym, b) dla zasilania napięciem zawierającym subharmoniczną o częstotliwości 5 Hz, c) dla zasilania napięciem zawierającym subharmoniczną o częstotliwości 30 Hz.



Rys. 4. Przebieg prędkości obrotowej silnika a) zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczną o częstotliwości równej 5 Hz i amplitudzie równej 1,5% amplitudy składowej podstawowej, b) zasilanego znamionowo. Obliczenia wykonano odpowiednio dla momentu bezwładności $J = 0,082 \text{ kg m}^2$ oraz $J = 0,0082 \text{ kg m}^2$.

Warto również nadmienić, że modelowanie prądów silnika za pomocą dotychczas stosowanych metod obwodowych wiązało się ze znaczącymi ograniczeniami. Jak już wspomniano, uwzględnienie wzrostu składowej podstawowej prądu magnesującego wymagało zastosowania modelu typu „czarna skrzynka” [2,3]. Podsumowując, zastosowanie metod polowych do analizy silnika indukcyjnego zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne umożliwia prowadzenie nowatorskich prac badawczych, które nie były możliwe z wykorzystaniem dotychczasowych modeli obwodowych.

3. Wnioski

Wnioski wynikające z przeglądu literatury, badań wstępnych oraz pozycji [2,3] wskazują na potrzebę prowadzenia dalszych, pogłębionych prac badawczych dotyczących silnika indukcyjnego zasilanego napięciem zawierającym

subharmoniczne. Plan badań obejmuje sprzężenie modelu elektromagnetycznego z cieplnym modelem obwodowym silnika [2,3], weryfikację eksperymentalną wyników obliczeń, wykonanie obliczeń dla różnych przypadków zaburzeń jakości napięcia oraz sformułowanie propozycji dopuszczalnych poziomów subharmonicznych napięcia w systemach elektroenergetycznych.

4. Literatura

- [1] de Abreu, J. P. G., Emanuel, A. E.: *Induction motor thermal aging caused by voltage distortion and imbalance: loss of useful life and its estimated cost*, IEEE Trans. on Industry Applications, 2002, Vol. 38, No. 1, pp. 12-20.
- [2] Pepliński M. *Wpływ subharmonicznych i interharmonicznych napięcia na prądy i temperaturę uzwojeń silników indukcyjnych małej mocy*, Rozprawa doktorska, Akademia Morska w Gdyni, 2014
- [3] Gnaciński P., Pepliński M., *Induction cage machine supplied with voltage containing subharmonics and interharmonics*, IET Electric Power Applications, Volume 8, Issue 8, September 2014, pp. 287 – 295
- [4] Gnaciński P., M. Pepliński, Szweida M. *Wpływ podharmonicznych na obciążenie cieplne silnika indukcyjnego*, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, nr 84/2009, s. 97-101, Katowice 2009.
- [5] Gnaciński P. *Windings temperature and loss of life of an induction machine under voltage unbalance combined with over or undervoltages*. IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 23, no. 2, June 2008, pp. 363-371.
- [6] Apsley, J. M.: *Derating of multiphase induction machines due to supply imbalance*, Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.46, no. 2, pp. 798-805, March-April 2010
- [7] Hsu, C. T., Chen, C. S., Lin, C. H.: *Electric power system analysis and design of an expanding steel cogeneration plant*, IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, Vol. 47, No. 4, pp. 1527-1535
- [8] Sürgevil T., Akpınar E.: *Effects of electric arc furnace loads on synchronous generators and asynchronous motors*, Proc. of International Conference on Electrical and Electronics Engineering ELECO 2009, Bursa, 5-8 Nov. 2009, pp. I-49 - I-53.
- [9] Yılmaz, I., Ermis, M., Cadirci, I.: *Medium-frequency induction melting furnace as a load on the power system*, IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, Vol. 48, No. 4, pp. 1203-1214
- [10] Deokar S. A., Waghmare L., Jadhav G. N.: *Voltage flicker assessment of induction motors used in the integrated water pumping station*, Proc. of 2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) & 2010 Power India, New Delhi, 20-23 December 2010.

- [11] Tennakoon, S., Perera, S., Robinson, D.: *Flicker attenuation—Part I: Response of three-phase induction motors to regular voltage fluctuations*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, no. 2, 2008, pp. 1207 – 1214
- [12] D. Gallo, R. Langella, A. Testa, A. Emanuel, *On the effects of voltage subharmonics on power transformers: a preliminary study*, 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP 2004, pp. 501–506
- [13] Kolagar, A. D., Shoulaie, A.: *Reduction of undesired harmonic components in a steel industrial plant with DC electric arc furnaces*, Proc. of 2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, 2011
- [14] Chang, G. W., Chen, S. K., Su, H. J, Wang, P. K.: *Accurate assessment of harmonic and interharmonic currents generated by VSI-fed drives under unbalanced supply voltages*, IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, Vol .26, No. 2, pp. 1083-1091
- [15] Basic D.: *Input current interharmonics of variable-speed drives due to motor current imbalance*, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 25, no. 4, October 2010, pp. 2797-2806.
- [16] Baptista J., Gonçalves J., Soares S., Valente, A., Morais, R., Bulas-Cruz, J., Reis, M. J.: *Induction motor response to periodical voltage fluctuations*, Proc. XIX International Conference on Electrical Machines ICEM, Roma, Italy 2010.
- [17] Fuchs E. F., Roesler D. J., Masoum M. A. S.: *Are harmonics recommendations according to IEEE and IEC too restrictive?*, IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, vol. 19, no. 4, pp. 1775-1786.

Autorzy

dr hab. inż. Piotr Gnaciński, prof. nadzw. AM, e-mail: p.gnacinski@we.am.gdynia.pl
mgr inż. Damian Hallmann,
email: d.hallmann@we.am.gdynia.pl
Akademia Morska w Gdyni
Katedra Elektroenergetyki Okrętowej
ul. Morska 83, 81-225 Gdynia