Piotr GNACIŃSKI
Damian HALLMANN

WSTĘPNE BADANIA WAHAŃ PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ SILNIKA INDUKCYJNEGO ZASILANEGO NAPIĘCIEM ZAWIERAJĄCYM SUBHARMONICZNE

STRESZCZENIE *Artykuł dotyczy wpływu subharmonicznych napięcia na wahania prędkości obrotowej silnika indukcyjnego klatkowego małej mocy. Badania wykonano metodą symulacyjną z wykorzystaniem wstępnego dwuwymiarowego modelu polowego silnika indukcyjnego. W pracy przedstawione zostały wyniki obliczeń dla subharmonicznych o różnej częstotliwości.*

Słowa kluczowe: *jakość napięcia, modelowanie polowe, silnik indukcyjny, subharmoniczne*
DOI: 10.5604/01.3001.0009.4813

1. WSTĘP

Jednym z zaburzeń jakości napięcia są subharmoniczne – składowe napięcia o częstotliwości mniejszej od częstotliwości składowej podstawowej. Są one spowodowane pracą pieców indukcyjnych [1], falowników [2, 3], cyklokonwerterów oraz tzw. odbiorników „niespokojnych" – np. pieców łukowych [4]. Innymi źródłami subharmonicznych jest ziemskie pole magnetyczne [5] oraz elektrownie wiatrowe [6]. Należy również nadmienić, że cykliczne wahania napięcia (seria zmian napięcia lub ciągłe zmiany wartości skutecznej napięcia) często można traktować jako złożenie subharmonicznych i interharmonicznych [7, 8]. Przyczyną wahań napięcia są piece indukcyjne, urządzenia walcownicze, spawarki, podgrzewacze elektryczne wody wielkich mocy oraz baterie kondensatorów służących do poprawy współczynnika mocy [1, 9–11].

dr hab. inż. Piotr GNACIŃSKI, prof. nadzw. AM, mgr inż. Damian HALLMANN
e-mail: [p.gnacinski; d.hallmann]@we.am.gdynia.pl

Akademia Morska w Gdyni, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia

Subharmoniczne napięcia powodują między innymi zjawisko migotania światła, wahania momentu obrotowego prądnic synchronicznych, podmagnesowanie rdzeni transformatorów [5, 7, 8, 11]. W silniku indukcyjnym powodują wprost strat mocy, temperatury uzwojeń, zwiększenie wartości skutecznej prądu płynącego przez uzwojenia oraz wahania prędkości obrotowej [8, 12, 13]. W wyniku wahań prędkości obrotowej w prądzie pobieranym przez silnik zasilany napięciem zawierającym subharmoniczne występują oprócz składowych subharmonicznych również interharmoniczne, a w prądzie silnika zasilanego napięciem zawierającym interharmoniczne – subharmoniczne [8, 12, 13].

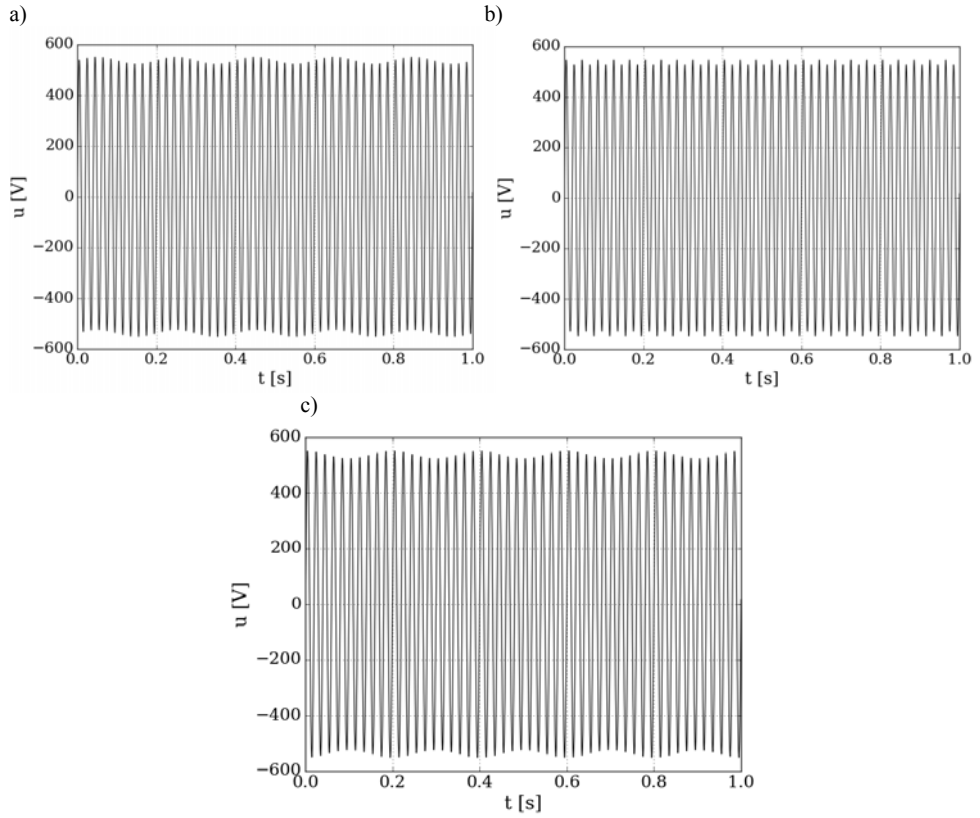
Wahania prędkości obrotowej silnika indukcyjnego zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne pierwszy raz odnotowano w pracy Tennakoon i współautorów [8]. Badania przedstawione w [8] (w systemach 50 Hz, subharmoniczne o częstotliwościach większych od 15 Hz [14]) zostały wykonane metodą obliczeniową z wykorzystaniem transformacji d-q. Należy jednak zauważyć, że w przypadku badanego silnika powyższa metoda może być bez zastrzeżeń stosowana tylko dla subharmonicznych o częstotliwościach zbliżonych do częstotliwości harmonicznej podstawowej [13, 15]. Wobec powyższego, celowe jest wykonanie analogicznych badań innymi metodami. W niniejszym artykule wstępną analizę wahań prędkości obrotowej wykonano w oparciu o wyniki obliczeń polowych.

2. WYNIKI BADAŃ

Obiektem badań jest silnik indukcyjny typu TSg 100L-4B o mocy 3 kW i prędkości synchronicznej 1500 obr/min. Dane silnika zamieszczono w pracach [15, 16]. Wszystkie prezentowane eksperymenty numeryczne wykonano z wykorzystaniem wstępnego modelu polowego silnika zaimplementowanego w środowisku ANSYS Maxwell 2D. Rozważany model silnika opisano w pracy [17] (Gnaciński P., Hallmann D., Pepliński M.), Wstępny model polowy silnika indukcyjnego zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne, Referat przedstawiony na LII Sympozjum Maszyn Elektrycznych). Parametry modelu symulacyjnego, jak i wymiary silnika oraz charakterystyka magnesowania blach elektrotechnicznych zostały wprowadzone na podstawie danych otrzymanych od producenta.

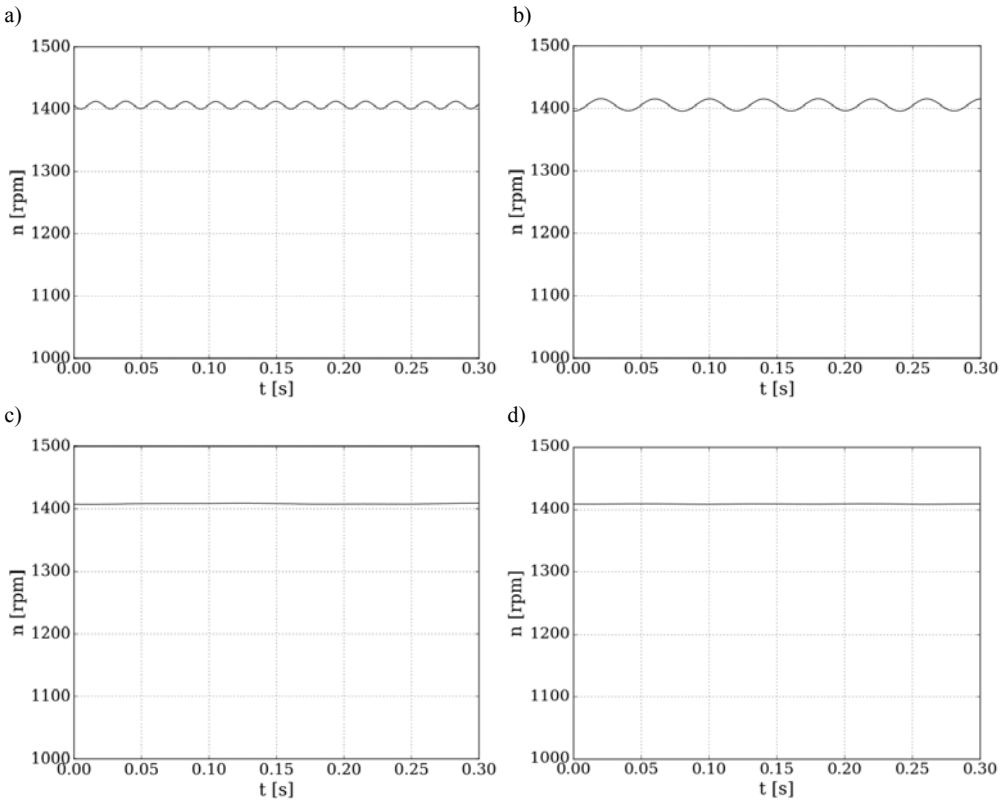
Moment bezwładności przyjęty do obliczeń jest równy sumie momentu bezwładności badanego silnika oraz momentu bezwładności prądnicy sprzęgniętej z silnikiem. Obliczenia zostały wykonane dla znamionowego momentu obciążenia (M = 20,25 Nm) oraz subharmonicznych napięcia o amplitudzie 2,5% składowej podstawowej i częstotliwościach równych 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz, 35 Hz, 40 Hz oraz 45 Hz. Należy nadmienić, że rzeczywiste subharmoniczne i interharmoniczne są zgodne z normą IEC 61000-4-7 [18] grupowane co 5 Hz w celu ograniczenia zjawiska przecieku widma. Wyniki prezentowane w pracy zarejestrowane zostały dla stanu ustalonego. Przebiegi napięcia zasilania zawierającego subharmoniczne o częstotliwościach 5 Hz, 25 Hz i 45 Hz przedstawiono na rysunku 1, a odpowiadające im przebiegi wartości chwilowych prędkości na rysunku 2. Ponadto, dla porównania na rysunku 2 zamieszczono przebieg prędkości obrotowej dla zasilania napięciem bez subharmonicznej.

Na kolejnym rysunku (rys. 3) zamieszczono charakterystykę amplitudy wahań prędkości obrotowej w funkcji częstotliwości subharmonicznych. Dla subharmonicznych o częstotliwości od 5 Hz do 45 Hz amplituda zaobserwowana amplituda wahań napięcia zmienia się w zakresie od 2,5 obr/min do 20,9 obr/min. Największą amplitudę wahań zaobserwowano dla subharmonicznych o częstotliwości 25 Hz, a najmniejszą dla 45 Hz. Dla subharmonicznych o częstotliwości 5 Hz amplituda wahań wynosiła 12,8 obr/min.

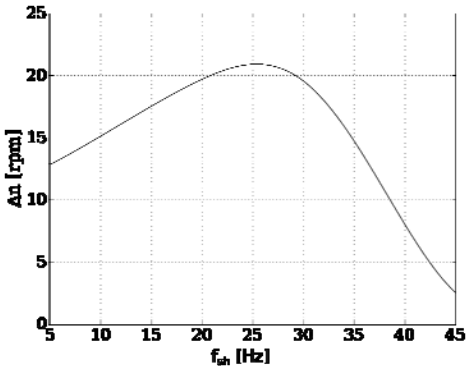


Rys. 1. Przebiegi napięcia międzyfazowego zawierającego subharmoniczną o amplitudzie równej 2,5% amplitudy składowej podstawowej oraz częstotliwości: a) 5 Hz, b) 25 Hz, c) 45 Hz

Należy podkreślić, że dla subharmonicznych o częstotliwości 25 Hz stwierdzono nie tylko największą amplitudę wahań prędkości obrotowej, ale zaobserwowano również szczególnie znaczące drgania i wibracje. W związku z tym, prezentowane wyniki obliczeń mogą być przydane dla celów analizy drgań i wibracji silnika indukcyjnego zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne.



Rys. 2. Przebiegi wartości chwilowych prędkości dla silnika zasilanego napięciem: a) zawierającym subharmoniczną o amplitudzie równej 2,5% amplitudy składowej podstawowej oraz częstotliwości 5 Hz, b) zawierającym subharmoniczną o amplitudzie równej 2,5% amplitudy składowej podstawowej oraz częstotliwości 25 Hz, c) zawierającym subharmoniczną o amplitudzie równej 2,5% amplitudy składowej podstawowej oraz częstotliwości 45 Hz, d) bez subharmonicznej



Rys. 3. Wykres amplitudy wahań prędkości obrotowej badanego silnika indukcyjnego w funkcji częstotliwości subharmonicznych napięcia

3. WNIOSKI

Dla badanego silnika stwierdzono największą amplitudę wahań prędkości obrotowej (ok. 1,5% prędkości znamionowej) dla subharmonicznych o częstotliwości 25 Hz. Otrzymane wyniki obliczeń mogą być przydatne przy analizie drgań i wibracji, które w przypadku rozważanego silnika są szczególnie istotne dla zasilania napięciem zawierającym subharmoniczną o częstotliwości 25 Hz. Szczegółowa analiza drgań i wibracji silnika indukcyjnego zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne będzie tematem prac badawczych prowadzonych w Katedrze Elektroenergetyki Okrętowej Akademii Morskiej w Gdyni. Ponadto, w ramach dalszych prac badawczych przewiduje się weryfikację eksperymentalną prezentowanych wyników obliczeń.

LITERATURA

1. Yılmaz I., Ermis M., Cadırcı I.: Medium-frequency induction melting furnace as a load on the power system, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 48, nr 4, s. 1203–1214, 2012.
2. 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, vol. 26, nr 2, s. 1083-1091, 2011.
3. Drabek, P., Kus, V.: EMC issues of low frequency interference of power electronic converters, Applied Mechanics and Materials, 284-287, s. 2516-2520, 2013.
4. 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.
5. Roberto Langella, Alfredo Testa, Fellow, Alexander E. Emanuel: On the effects of subsynchronous interharmonic voltages on power transformers: Three phase units, IEEE Transactions On Power Delivery, vol. 23, nr 4, październik 2008.
6. Schostan, S., Dettman, K. D., Purellku, I., Schulz, D.: Harmonics and powers of doubly fed induction generators at balanced sinusoidal voltages, International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation, Łagów-Poland, s. 213-217, 15-18 czerwca 2010.
7. Gallo D., Langella R., Testa A., Emanuel A.: On the effects of voltage subharmonics on power transformers: a preliminary study, 11 th International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHPQ, Lake Placid, s. 501–506, 2004.
8. 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, nr 2, s. 1207–1214, 2008.
9. Bolen M.H.J., Gu I.Y.H.: Signal processing of power quality disturbances, Wiley, New York 2006.

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, s. 20–23, październik 2010.
11. Sürgevil T., Akpnar 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, s. I-49–I-53, 5-8 listopada 2009.
12. 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, nr 2, s. 1207 – 1214, 2008.
13. Pepliński M.: Wpływ subharmonicznych i interharmonicznych napięcia na prądy i temperaturę uzwojeń silników indukcyjnych małych mocy, Rozprawa doktorska, Akademia Morska w Gdyni, 2014.
14. Gallo D., Landi C., Langella R. and Testa A.: Limits for low frequency interharmonic voltages: Can they be based on the Flickermeter use, Power Tech, 2005 IEEE Russia, St. Petersburg, s. 1-7, 2005.
15. Gnaciński P., Pepliński M.: Induction cage machine supplied with voltage containing subharmonics and interharmonics, IET Electric Power Applications, vol. 8, zeszyt 8, s. 287 – 295, wrzesień 2014.
16. 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, nr 2, s. 363-371, czerwiec 2008.
17. Gnaciński P., Hallmann D., Pepliński M.: Wstępny model polowy silnika indukcyjnego zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne, Referat zgłoszony na LII Sympozjum Maszyn Elektrycznych, 2016.
18. 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.

Przyjęto do druku dnia 05.12.2016 r.

PRELIMINARY STUDY ON ROTATIONAL SPEED FLUCTUATIONS OF INDUCTION MOTOR SUPPLIED WITH VOLTAGE CONTAINING SUBHARMONICS

Piotr GNACIŃSKI, Damian HALLMANN

ABSTRACT *The article concerns rotational speed fluctuation of an low-power induction cage machine supplied with voltage containing subharmonics. The investigations were carried out with simulation method employing the preliminary 2D field model of the induction cage machine. The results of calculations were presented for voltage subharmonics of various frequencies.*

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

Dr hab. inż. Piotr GNACIŃSKI, prof. nadzw. AM – ukończył Wydział Elektryczny Politechniki Gdańskiej w roku 1993. Stopień doktora i doktora habilitowanego uzyskał na Politechnice Gdańskiej w roku 2000 oraz 2011. Od roku 1993 pracuje w Katedrze Elektroenergetyki Okrętowej Wyższej Szkole Morskiej w Gdyni (obecnie Akademia Morska w Gdyni). W latach 2008-2012 był skarbnikiem i sekretarzem Instrumentation and Measurement Society Sekcji Polskiej IEEE. Jego zainteresowania naukowe skupiają się głównie wokół maszyn elektrycznych oraz zagadnień jakości energii elektrycznej.

Mgr inż. Damian HALLMANN – stopień mgr inż. uzyskał na Wydziale Elektrycznym Akademii Morskiej w Gdyni w 2012 r. W latach 2011 – 2013 pracował jako pracownik inżynieryjno-techniczny w Katedrze Elektroenergetyki Okrętowej Akademii Morskiej w Gdyni, a od 2013 roku pracuje, jako asystent w Katedrze Elektroenergetyki Okrętowej w Akademii Morskiej w Gdyni. Jego zainteresowania naukowe skupiają się głównie wokół maszyn elektrycznych.