

Piotr Gnaciński, Andrzej Budziłowicz, Damian Hallmann, Marcin Pepliński
Akademia Morska w Gdyni

KONCEPCJA BADAŃ DRGAŃ I WIBRACJI SILNIKA INDUKCYJNEGO ZASILANEGO NAPIĘCIEM ZAWIERAJĄCYM SUBHARMONICZNE

Praca dotyczy koncepcji badań wpływu subharmonicznych napięcia na drgania i wibracje silnika indukcyjnego klatkowego. Przedstawiono cel i metodykę badań. Zaprezentowano wstępny dwuwymiarowy model połowy silnika indukcyjnego, zaimplementowany w środowisku Maxwell. Zamieszczono opis stanowiska pomiarowego, a także wstępne wyniki obliczeń numerycznych przebiegu momentu obrotowego dla silnika indukcyjnego klatkowego o mocy 3 kW.

Słowa kluczowe: drgania, wibracje, maszyna indukcyjna, jakość napięcia.

WSTĘP

W niektórych systemach elektroenergetycznych w przebiegach napięcia występują składowe o częstotliwości niższej od częstotliwości harmonicznej podstawowej – subharmoniczne (podsynchroniczne interharmoniczne) napięcia. Jedną z przyczyn ich występowania jest praca odbiorników nieliniowych, np. pieców łukowych [12, 17], cyklokonwerterów [11] czy przemienników częstotliwości [2, 4]. Przyczyną powstawania składowych subharmonicznych i interharmonicznych w przebiegach napięcia zasilającego, spowodowanych przez tego typu odbiorniki, są głównie asynchroniczne procesy komutacyjne, tj. procesy niesynchronizowane z częstotliwością harmonicznej podstawowej napięcia. Subharmoniczne te są wzmacniane na skutek rezonansu równoległego pomiędzy kondensatorem obwodu pośredniczącego i indukcyjnością systemu energetycznego, a następnie przenikają do systemu elektroenergetycznego [9].

Źródłem rozważanych zaburzeń są również elektrownie wiatrowe [12]. W ich przypadku emisja subharmonicznych jest związana m.in. z efektem cienia aerodynamicznego wieży [12].

Cykliczne wahania napięcia często traktuje się jako złożenie subharmonicznych i interharmonicznych [6, 19]. Jedną z przyczyn powstawania okresowych wahań napięcia są zmiany obciążenia, spowodowane głównie przez odbiorniki dużych mocy. Do odbiorników dużych mocy powodujących wahania napięcia należą: piece indukcyjne, urządzenia walcownicze, spawarki, podgrzewacze elektryczne wody wielkich mocy oraz baterie kondensatorów służących do

poprawy współczynnika mocy [3, 5, 17, 20]. Przykładowo w pracy [17] opisano wpływ pieców indukcyjnych dużej mocy zainstalowanych w stalowniach na pracę prądnicy synchronicznej i silnika indukcyjnego. Pomiary wykonano w dwóch podsystemach elektroenergetycznych: w pierwszym pracował jeden, a w drugim pracowały jednocześnie cztery piece indukcyjne. Nawet przy pracy tylko jednego pieca indukcyjnego amplituda wahań napięcia wyniosła około 3%.

Należy również nadmienić, że subharmoniczne występują także w napięciu wyjściowym niektórych falowników [16].

Przykładowe wyniki badań dotyczące występowania subharmonicznych w rzeczywistych systemach elektroenergetycznych zamieszczono w pracy [1]. W budynku z dużą liczbą odbiorników nieliniowych, znajdującym się w pobliżu huty, maksymalna wartość pierwiastka z sumy kwadratów subharmonicznych o częstotliwości 5, 10,...45 Hz wynosiła 1,67% amplitudy podstawowej harmonicznej. Należy podkreślić, że nawet pozornie pomijalna zawartość subharmonicznych w napięciu negatywnie wpływa na pracę różnych elementów systemu elektroenergetycznego. Subharmoniczne powodują m.in. wahania momentu obrotowego prądnic synchronicznych [17], podmagnesowywanie rdzeni transformatorów [7, 14], zjawisko migotania światła [10] oraz wzrost prądu magnesującego, temperatury uzwojeń oraz drgania i wibracje silników indukcyjnych [8, 15].

Silnik indukcyjny, zasilany napięciem zawierającym subharmoniczne, jest tematem licznych prac badawczych. Dotychczas badano wpływ subharmonicznych na prądy, strumień magnetyczny, temperaturę uzwojeń, starzenie cieplne układu izolacyjnego. Należy podkreślić, że jak dotąd w literaturze przedmiotu nie było prac badawczych dotyczących drgań i wibracji silnika indukcyjnego, zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne. Jednocześnie w czasie badań doświadczalnych [8, 15], prowadzonych przez autorów, stwierdzono silne drgania i wibracje. Rozważane zjawiska stanowią jedną z przyczyn uszkodzeń silników indukcyjnych [13].

Podsumowując, istnieje potrzeba prowadzenia prac badawczych dotyczących wpływu subharmonicznych napięcia na drgania i wibracje silnika indukcyjnego.

1. CEL I METODYKA BADAŃ

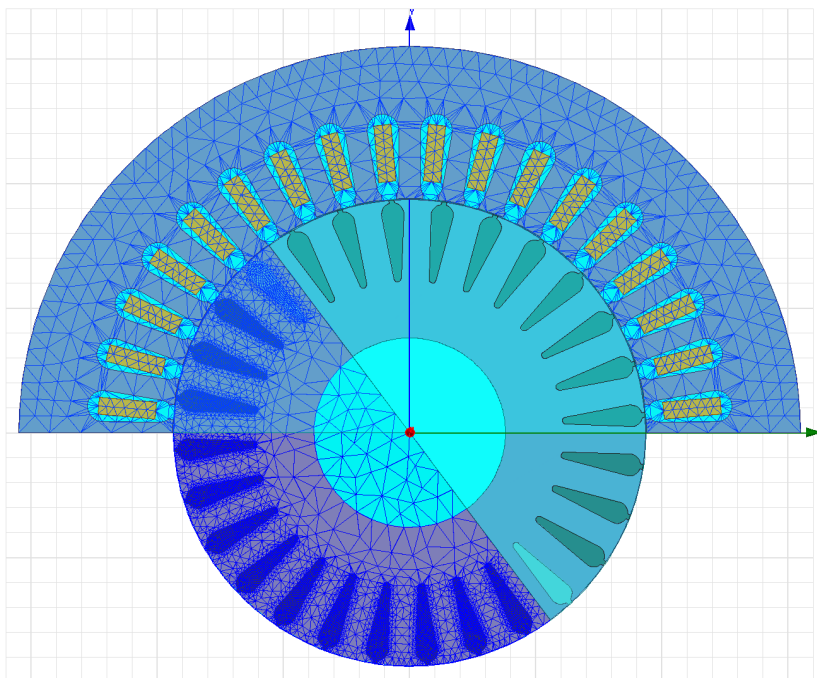
Celem proponowanych badań jest zdobycie nowej wiedzy o wpływie parametrów napięcia zasilania na poziom drgań i wibracji oraz zjawisk, które je powodują, np. wahań momentu obrotowego. W dalszych pracach badawczych przewidziano sformułowanie propozycji dopuszczalnych poziomów subharmonicznych napięcia z uwzględnieniem kryterium drgań i wibracji silników indukcyjnych. Należy podkreślić, że powyższe badania są częścią szerokiego programu badań silnika indukcyjnego, zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne, realizowanego obecnie w Katedrze Elektroenergetyki Okrętowej Akademii Morskiej w Gdyni.

Dla celów badań drgań i wibracji silnika indukcyjnego przewidziano zastosowanie metody eksperymentalnej oraz symulacyjnej za pomocą modeli polowych i obwodowych.

1.1. Modele symulacyjne

Wstępny model połowy 2D silnika indukcyjnego klatkowego typu TSg100L-4B został zaimplementowany w środowisku Ansoft Maxwell. Model opracowano na podstawie rysunków technicznych oraz charakterystyki magnesowania blachy dostarczonych przez producenta. Moc znamionowa badanego silnika wynosi $P_N = 3$ kW, prąd znamionowy – $I_N = 6,9$ A, prędkość znamionowa $n_N = 1415$ obr/min, moment znamionowy – $M_N = 20,25$ Nm, układ połączeń – trójkąt.

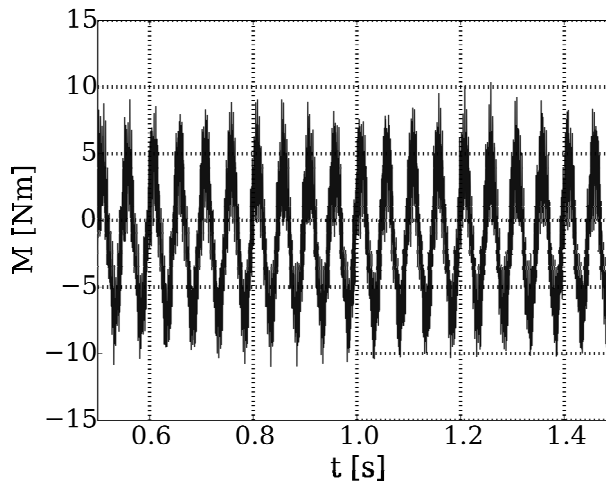
Poniżej, na rysunku 1 przedstawiono siatkę elementów skończonych dla badanego silnika, wykorzystaną w symulacjach komputerowych. Na kolejnych rysunkach (rys. 2 i 3) zamieszczono przykładowe przebiegi momentu obrotowego wyznaczone numerycznie.



Rys. 1. Siatka elementów skończonych dla badanego silnika indukcyjnego typu TSg100L-4B, wykorzystana przy obliczeniach dla subharmonicznej o częstotliwości 30 Hz i wartości $1,5\% U_N$

Fig. 1. Mesh for investigated induction motor TSg100L-4B type, used during computations for voltage subharmonic of frequency 30 Hz and value $1,5\% U_{rat}$

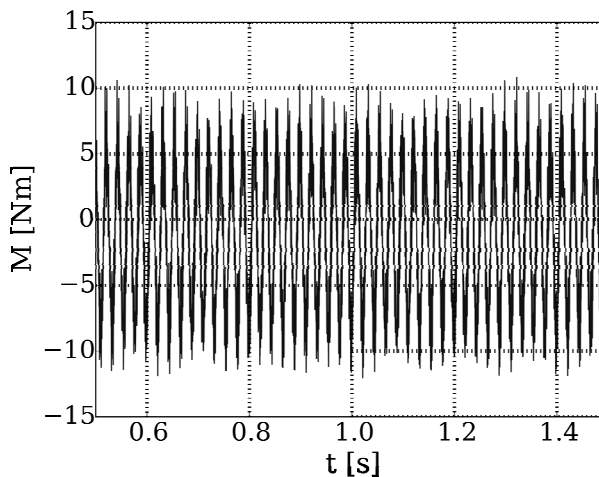
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 2. Przebieg momentu obrotowego dla badanego silnika indukcyjnego typu TSg100L-4B. Obliczenia wykonano dla subharmonicznej napięcia o wartości 1,5% U_N , częstotliwości $f = 30$ Hz, momentu obciążenia $M = 0,8$ Nm

Fig. 2. Rotational torque of investigated induction motor TSg100L-4B type. Computations were made for voltage subharmonic of frequency 30 Hz, value 1,5% U_{rat} and load torque of 0.8 Nm

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 3. Przebieg momentu obrotowego dla badanego silnika indukcyjnego typu TSg100L-4B. Obliczenia wykonano dla subharmonicznej napięcia o wartości 1,5% U_N , częstotliwości $f = 5$ Hz, momentu obciążenia $M = 0,8$ Nm

Fig. 3. Rotational torque of investigated induction motor TSg100L-4B type. Computations were made for voltage subharmonic of frequency 5 Hz, value 1,5% U_{rat} and load torque of 0.8 Nm

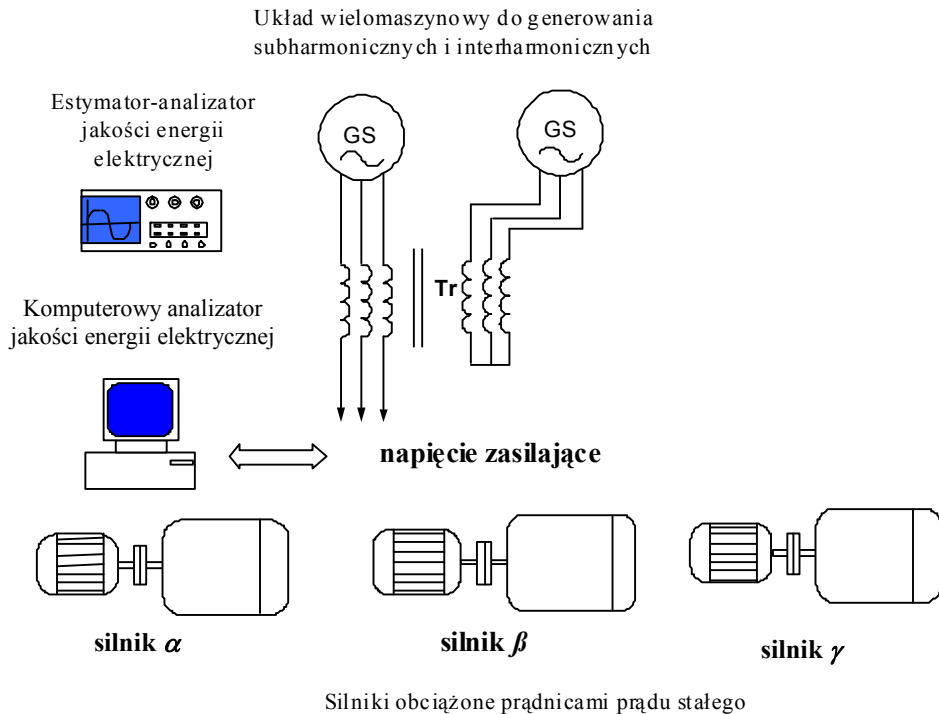
Źródło: opracowanie własne.

Obliczenia wykonano dla subharmonicznej napięcia o wartości $1,5\% U_N$, częstotliwości odpowiednio $f = 30 \text{ Hz}$ (rys. 2) i $f = 5 \text{ Hz}$ (rys. 3) oraz momentu obciążenia $M = 0,8 \text{ Nm}$. W rozważanym przypadku subharmoniczne napięcia powodują silne pulsacje momentu obrotowego o amplitudzie ok. 30–50% momentu znamionowego.

Należy nadmienić, że dla celów analizy wahań momentu obrotowego przewidziano również wykonanie odpowiednich obliczeń za pomocą modeli obwodowych, opisanych i zweryfikowanych eksperymentalnie w pracach [8, 15].

1.2. Stanowisko pomiarowe

W skład stanowiska pomiarowego (rys. 4) wchodzi: wielomaszynowy układ do generowania subharmonicznych i interharmonicznych, trzy 3-fazowe silniki indukcyjne o mocach 3–5 kW, analizatory jakości energii elektrycznej oraz układ do pomiarów drgań i wibracji.



Rys. 4. Uproszczony schemat stanowiska pomiarowego [15]

Fig. 4. Simplified diagram of measurement stand [15]

Wielomaszynowy układ do generowania subharmonicznych i interharmonicznych składa się z dwóch prądnic synchronicznych jawnobiegunowych oraz transformatora. Prądnice są napędzane za pomocą silników indukcyjnych zasilanych z falowników napięcia. Do zasilania silnika prądnicy wytwarzającej podstawową harmoniczną napięcia wykorzystano falownik firmy ABB, pracujący w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego, co umożliwi utrzymanie stałej prędkości obrotowej silnika.

Zdjęcie układu wielomaszynowego wraz z opisem jego najważniejszych elementów pokazano na rysunku 5. Dane znamionowe prądnic, silników oraz falowników, wchodzących w skład rozważanego układu wielomaszynowego, zostały zaprezentowane w pracy [15].



Rys. 5. Zdjęcie układu wielomaszynowego do generowania subharmonicznych i interharmonicznych [15]

1 – prądnica synchroniczna wytwarzająca harmoniczną podstawową napięcia wraz z silnikiem napędowym (2) i falownikiem (3); 4 – prądnica synchroniczna wytwarzająca badane subharmoniczną i interharmoniczne wraz z silnikiem napędowym (5) i falownikiem (6); 7 – transformator 3-fazowy; 8 – estymator – analizator jakości energii elektrycznej; 9 – komputerowy analizator jakości energii elektrycznej

Fig. 5. Multi-machine system for subharmonics and interharmonics generation

1 – synchronous generator for the fundamental voltage component generation, together with prime mover (2) and inverter (3), 4 – a synchronous generator for investigated subharmonics and interharmonics components generation, together with prime mover (5) and inverter (6), 7 – 3-ph transformer, 8 – power quality estimator-analyser, 9 – PC based power quality analyser

Liczbę zwojów transformatora sprzęgającego obie prądnice dobrano eksperymentalnie w taki sposób, aby była możliwa płynna regulacja amplitud badanych subharmonicznych i interharmonicznych. W celu generowania napięcia zawierającego rozważane składowe jedną z prądnic synchronicznych należy napędzać

z prędkością odpowiadającą częstotliwości harmonicznej podstawowej napięcia, a drugą – z prędkością odpowiadającą częstotliwości badanych subharmonicznych i interharmonicznych.

Komputerowy analizator jakości energii elektrycznej składa się z karty pomiarowej PCI-703-16A *Eagle Technology* oraz z układu służącego do kondycjonowania sygnału pomiarowego. Karta pomiarowa posiada 16 wejść analogowych oraz 14-bitowy analogowo-cyfrowy konwerter. Sygnał wejściowy jest próbkowany z częstotliwością 10,5 kHz. Częstotliwość odcięcia zastosowanego filtra antyaliasingowego wynosi 3,5 kHz.

Uniwersalny estymator – analizator jakości energii elektrycznej został opracowany do celów komercyjnych w Katedrze Elektroenergetyki Okrętowej Akademii Morskiej w Gdyni [18]. Należy nadmienić, że posiada on certyfikat Polskiego Rejestru Statków.

Obecnie trwają prace nad uruchomieniem układu do pomiaru drgań i wibracji. W jego skład wchodzi trójosiowe piezoelektryczne czujniki drgań i wibracji firmy Bruel & Kjaer 4524B o dużej czułości 100 mV/ms² i zakresie pomiarowym ± 70 ms⁻² (7g), które jednocześnie transmitują sygnał na trzy kanały karty pomiarowej firmy *National Instruments* NI 9234 o rozdzielczości 24 bitów; zakresie dynamicznym 102 dB, z filtrem antyaliasingowym. Układ będzie współpracował z oprogramowaniem LabView z dodatkowymi modułami i zestawem narzędzi do analizy zarejestrowanych pomiarów.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzenie proponowanych badań umożliwi zdobycie nowej wiedzy na temat wpływu jakości napięcia zasilania na drgania i wibracje silników indukcyjnych. Poznanie rozważanych zjawisk może być przydatne dla celów opracowania propozycji modyfikacji przepisów i norm dotyczących jakości napięcia. Prezentowana koncepcja jest częścią szerokiego programu badań silnika indukcyjnego zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne.

LITERATURA

1. Barros J., de Apraiz M., Diego R.I., *Measurement of subharmonics in power voltages*, Power Tech., IEEE Conference, Lausanne, Switzerland, 1–5 July 2007, s. 1736–1740.
2. Basic D., *Input current interharmonics of variable-speed drives due to motor current imbalance*, IEEE Transactions on Power Delivery, October 2010, vol. 25, no. 4, s. 2797–2806.
3. Bolen M.H.J., Gu I.Y.H., *Signal processing of power quality disturbances*, Wiley, New York 2006.

4. 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, s. 1083–1091.
5. 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.
6. Gallo D., Langella R., Testa A., Emanuel A., *On the effects of voltage subharmonics on power transformers: a preliminary study*, 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP, Lake Placid 2004, s. 501–506.
7. Gnaciński P., Hallmann D., Jankowski P., *Badanie wpływu subharmonicznego napięcia na pracę transformatora jednofazowego*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 2014, nr 4(104) s. 173–178.
8. Gnaciński P., Pepliński M., *Induction cage machine supplied with voltage containing subharmonics and interharmonics*, IET Electric Power Applications, vol. 8, no. 8, September 2014, s. 287–295.
9. Goyal V., Wadhawani S., *Interharmonics of cycloconverter excited induction motor and design its filter circuit*, International Journal of Electrical Engineering, 2012, vol. 5, no. 3, s. 329–334.
10. Hanzelka Z., *Jakość energii elektrycznej. Wahania napięcia*, www.elektroinfo.pl.
11. 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, s. 1527–1535.
12. 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, Tehran 2011.
13. Kueck J.D., Casada D.A., Otaduy P.J., *A comparison of two energy efficient motors*, IEEE Transactions on Energy Conversion, June 1998, vol. 13, no. 2, s. 140–147.
14. Langella R., Testa A., Emanuel A., *On the effects of subsynchronous interharmonic voltages on power transformers: single phase units*, IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, vol. 23, no. 4, s. 2480–2487.
15. Pepliński M., *Wpływ subharmonicznego i interharmonicznego napięcia na prądy i temperaturę uzwojeń silników indukcyjnych małych mocy*, rozprawa doktorska, Akademia Morska w Gdyni, Gdynia 2014.
16. Stumpf P., Jordan R.K., Nagy I., *Subharmonics generated by space vector modulation in ultrahigh speed drives*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, vol. 59, no. 2, s. 1029–1039.
17. 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 November 2009, s. I-49–I-53.
18. Tarasiuk T., *Estimator-analyzer of power quality: Part I - Methods and algorithms*, Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 2011, vol. 44, no. 1, s. 238–247.
19. 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, 2008, vol. 23, no. 2, s. 1207–1214.
20. 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, s. 1203–1214.

CONCEPT OF STUDY ON CHARRING AND VIBRATION OF INDUCTION MOTOR SUPPLIED WITH VOLTAGE CONTAINING SUBHARMONICS

Summary

This work concerns the concept of investigation on charring and vibration of an induction cage machine supplied with voltage containing subharmonics injection. The research methodology is described. A preliminary two-dimensional field model implemented in the environment of Maxwell is presented. The laboratory stand is described. The results of preliminary numerical calculations of rotational torque variation are shown for a 3 kW induction cage motor.

Keywords: *charring, vibration, induction machine, power quality.*