

Piotr Gnaciński, Uniwersytet Morski, Gdynia  
Piotr Klimczak, Z.M.E. "EMIT" S.A. Grupa Cantoni, Żychlin

## BADANIA WSTĘPNE SILNIKA O MOCY 5600 kW W WARUNKACH WYSTĘPOWANIA SUBHARMONICZNYCH NAPIĘCIA

### PRELIMINARY INVESTIGATIONS OF 5600 kW INDUCTION MOTOR UNDER VOLTAGE CONTAINING SUBHARMONICS

**Streszczenie:** Artykuł poświęcony jest badaniom silnika o mocy 5600 kW przeznaczonym do napędu wentylatora o dużym masowym momencie bezwładności, zasilanym napięciem zawierającym subharmoniczne. Wyniki obliczeń polowych wykonane w środowisku Ansys Electronics (Ansys Electromagnetics) zostały przedstawione dla subharmonicznych napięcia o różnych częstotliwościach. W artykule przedstawiono wpływ subharmonicznych napięcia na przebiegi prądu w uzwojeniu stojana, wahania momentu elektromagnetycznego oraz straty mocy.

Stwierdzono, że subharmoniczne występujące w rzeczywistych systemach elektroenergetycznych mogą powodować znaczące wahania momentu elektromagnetycznego oraz wzrost strat w uzwojeniach silników dużej mocy. Wzrost strat jest szczególnie istotny w przypadku subharmonicznych o niskiej częstotliwości i może spowodować nadmierny wzrost temperatury uzwojeń. Praca maszyny z wyższą temperaturą uzwojenia może doprowadzić do szybszej degradacji termicznej układu izolacyjnego i do uszkodzenia silnika.

**Abstract:** This work deals with investigations of 5600 kW induction cage motor designed for driving a fan of high value moment of inertia, under supply voltage containing subharmonics injection. The results of field calculations in Ansys Electronics (Ansys Electromagnetics) environment are presented for subharmonics of various frequencies. The article presents the influence of subharmonic voltage on the stator windings current waveforms, electromagnetic torque fluctuations and power losses of the motor. It was found that subharmonics occurring in real power systems can cause significant fluctuations of the electromagnetic torque and increase in power losses of high power machines. The increase of power losses is particularly important in the case of low frequency subharmonics and it can cause excessive windings heating.

The operation of high power machines with a higher stator windings temperature can lead to a faster thermal degradation of insulation system and motor destruction.

**Słowa kluczowe:** metoda elementów skończonych, silnik indukcyjny, jakość napięcia, odkształcenia przebiegu napięcia, subharmoniczne

**Keywords:** finite element method, induction motor, power quality, voltage waveform distortions, subharmonics.

#### 1. Wstęp

W rzeczywistych systemach elektroenergetycznych powszechnie występują odkształcenia przebiegu napięcia. W praktyce, w przebiegu napięcia oprócz składowej podstawowej występują niepożądane składowe o innych częstotliwościach [1] [2]. Szczególnie szkodliwe są składowe o częstotliwości niższej niż częstotliwość podstawowa przebiegu napięcia. Składowe te noszą nazwę subharmonicznych lub subsynchronicznych interharmonicznych. Przyczyną ich występowania jest praca odbiorników nieliniowych, takich jak np. przemienniki częstotliwości, piece łukowe, czy cyklokonwertery [3] [4] oraz odnawialnych źródeł energii [2] [5]. Obecność subharmonicznych w przebiegu napięcia ma negatywny wpływ na pracę różnych

elementów systemu elektroenergetycznego. Subharmoniczne napięcia mogą powodować między innymi zjawisko migotania światła, nasycenia rdzeni transformatorów oraz wahania momentu obrotowego w generatorach synchronicznych [6] [7]. W silnikach indukcyjnych dochodzi do lokalnego nasycenia obwodu elektromagnetycznego, wahań momentu elektromagnetycznego powodującego tzw. "niespokojny bieg" silnika związany ze zmianami prędkości obrotowej układu napędowego oraz przede wszystkim do wzrostu strat wydzielanych w uzwojeniach, zarówno stojana, jak i wirnika silnika [4] [6] [7] [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14] [15]. Wzrost strat wiąże się ze wzrostem temperatury uzwojeń [8] [9] [10] [12]

i w skrajnych przypadkach może doprowadzić do degradacji układu izolacyjnego i zniszczenia silnika.

Pomimo szkodliwego oddziaływania subharmonicznych na różne elementy systemu elektroenergetycznego, w normach dotyczących jakości napięcia nie określono ich dopuszczalnych poziomów między innymi ze względu na brak wystarczających danych [16]. W związku z tym istnieje potrzeba wyznaczenia dopuszczalnych poziomów rozważanych zaburzeń dla celów odpowiednich norm i przepisów.

Dotychczasowe prace badawcze [4][6][7][8][9][10][11][12][13][14][15] dotyczące wpływu subharmonicznych na silnik indukcyjny prowadzone były w znacznej mierze za pomocą metod obwodowych. Należy podkreślić, że mają one ograniczone zastosowanie do analizy silnika indukcyjnego zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne [9][10]. Z kolei badania z wykorzystaniem metod doświadczalnych oraz polowych dotyczyły głównie silników małej mocy [9][10][11][12][13][14]. W artykule przedstawiono wyniki wstępnych badań i analiz wpływu subharmonicznych napięcia na pracę silnika o mocy 5,6 MW, średniego napięcia. Silnik ten wykonany został przez Zakład Maszyn Elektrycznych "EMIT" S.A. dla jednej z elektrowni na terytorium Polski. Obliczenia i analizy wykonano przy użyciu metod elementów skończonych.

## 2. Model silnika

Badania symulacyjne oraz analizy przeprowadzono dla silnika typu Sfw900HV8D, o mocy 5600 kW i napięciu znamionowym 10500 V produkcji Zakładu Maszyn Elektrycznych "EMIT" S.A. Grupa Cantoni.

Analizy i badania silnika przeprowadzono w środowisku ANSYS Electronics Desktop (ANSYS Electromagnetics). Po wprowadzeniu danych konstrukcyjnych silnika w module RMXprt wygenerowano model 2D silnika. Po wykonaniu modelu 2D wprowadzone zostały parametry materiałów użytych w fazie produkcji silnika oraz zweryfikowano, na podstawie próby silnika [17], przewodności jego materiałów przewodowych. Do obliczeń wykorzystana została siatka typu Tau, która jest oferowana przez Ansys Electromagnetics Suite 18.0.0.



Rys. 1. Obiekt badań



Rys. 2. Obiekt badań podczas prób na stacji prób producenta

Podstawowe dane znamionowe silnika przedstawiono w tabeli 1.

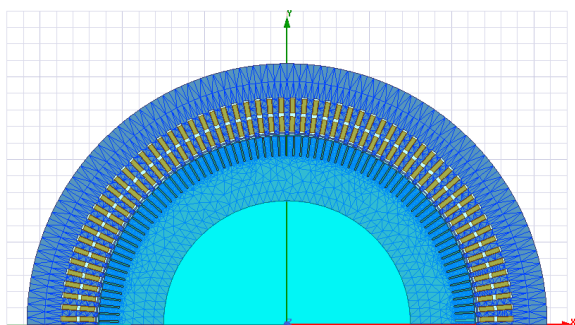
Tabela 1. Parametry znamionowe badanego silnika

Moc znamionowa	5600 kW
Napięcie znamionowe	10500 V (Δ)
Częstotliwość znamionowa	50 Hz
Prąd znamionowy	375 A
Współczynnik mocy $\cos\phi$	0,85
Prędkość znamionowa	745 rpm

Siatka użyta do obliczeń składała się z elementów trójkątnych o maksymalnych długościach boków:

- 6,9 mm dla szczeliny powietrznej;
- 9,1 mm dla uzwojenia stojana;
- 2,5 mm dla uzwojenia wirnika.

Do obliczeń został przyjęty czas całkowania równy 0,1 ms.



Rys. 3. Siatka podziału

Dla tak przygotowanego modelu przeprowadzono obliczenia celem weryfikacji utworzonego modelu 2D z rzeczywistym obiektem badań. Porównano parametry uzyskane na podstawie obliczeń z parametrami uzyskanymi w trakcie próby nagrzewania rzeczywistego silnika. W tabeli 2 zamieszczono zestawienie wyników obliczeń z wynikami próby nagrzewania silnika. Z uwagi na dużą moc znamionową silnika wykonana została zastępcza próba jego nagrzewania przy obniżonym napięciu oraz przy obniżonej mocy na wale. Silnik podczas próby na stacji prób producenta zasilany był napięciem międzyfazowym (przewodowym) o wartości skutecznej  $U=5231$  V i pobierał prąd o wartości  $I=163,53$  A oraz moc  $P_1=1309,3$  kW [17].

Tabela 2. Porównanie wyników obliczeń z wynikami badań silnika [17]

Wielkość	Wartość obliczona	Wartość wg próby
Prąd	165,3 A	163,53 A
Współczynnik mocy $\cos\phi$	0,882	0,884
Straty całkowite	36364 W	39458 W

Za straty całkowite przyjęto sumę strat w uzwojeniu stojana i wirnika otrzymanych z rozdziału strat poszczególnych wg próby nagrzewania silnika, oraz strat w żelazie i strat mechanicznych wyznaczonych na podstawie rozdziału strat rozszerzonego biegu jałowego.

W przypadku obliczeń za straty całkowite przyjęto sumę strat przewodowych StrandedR (strat związanych z rezystancją uzwojenia stojana) i strat Solid (strat elektrycznych w przewodnikach typu stałego m.in. wirnika silnika), strat Core (strat w rdzeniu), oraz strat mechanicznych otrzymanych w wyniku próby silnika. Parametry punktu pracy znamionowej, obliczone za pomocą prezentowanego modelu, zamieszczono w tabeli 3. Obliczenia przeprowadzono dla prędkości znamionowej, a za parametr wzorcowy przyjęto wartość prądu znamionowego silnika.

Tabela 3. Wyniki obliczeń parametrów znamionowych silnika

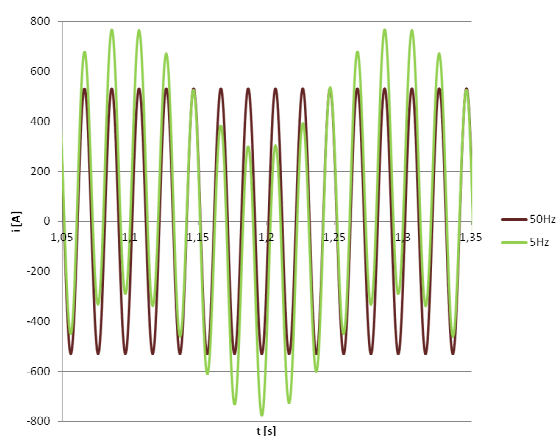
Wielkość	Wartość obliczona
Prąd silnika	376,1 A
Współczynnik mocy $\cos\phi$	0,88
Straty całkowite	123090 W

### 3. Wyniki badań

Poniżej przedstawiono wyniki badań wstępnych wpływu subharmonicznych napięcia na prąd, straty mocy oraz moment elektromagnetyczny silnika. Obliczenia wykonano dla składowej podstawowej napięcia zasilania oraz prędkości obrotowej o wartości znamionowej. Stała prędkość obrotowa odpowiada pracy z obciążeniem o momencie bezwładności znacznie większym od momentu bezwładności silnika. W przypa-

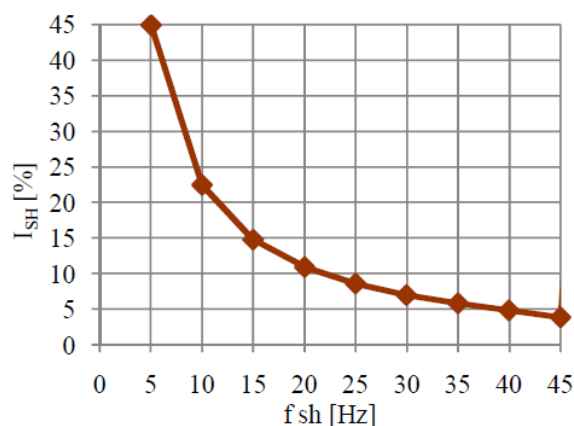
dku badanego silnika masowy moment bezwładności wirnika wynosi  $1367 \text{ kgm}^2$  i jest kilkakrotnie mniejszy od masowego momentu bezwładności wirnika urządzenia napędzanego (wentylatora) wynoszącego  $9300 \text{ kgm}^2$ . Dla wszystkich rozważanych przypadków założona została stała wartość subharmonicznej napięcia równa 1% składowej podstawowej. Należy podkreślić, że subharmoniczną o zbliżonej wartości odnotowano w rzeczywistym systemie elektroenergetycznym [2].

Na rys. 4 zamieszczono przebieg prądu fazowego silnika dla subharmonicznej o częstotliwości  $f_{sh}=5 \text{ Hz}$  oraz prądu dla przypadku zasilania silnika napięciem nieodkształconym.



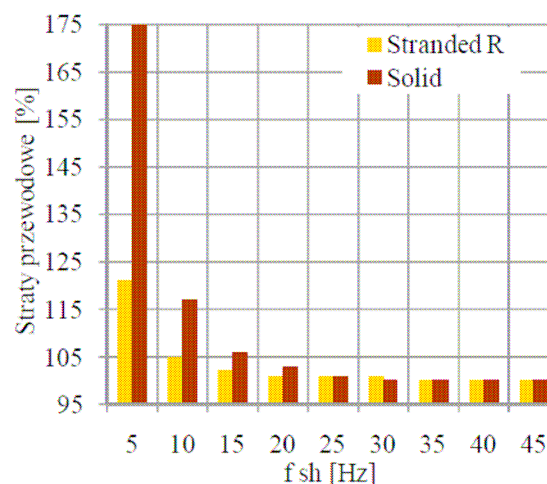
Rys. 4. Przebiegi prądu silnika dla subharmonicznej napięcia o wartości  $U_{sh}=1,0\% U_{rat}$  i częstotliwości  $f_{sh}=5 \text{ Hz}$  oraz dla napięcia nieodkształconego  $50 \text{ Hz}$

Na rys. 5 przedstawiono zależność amplitud subharmonicznych prądu w funkcji częstotliwości. Subharmoniczna napięcia o częstotliwości  $f_{sh}=5 \text{ Hz}$  spowodowała przepływ subharmonicznej prądu o wartości amplitudy  $I_{sh}=239 \text{ A}$ , co stanowi ok. 45% składowej podstawowej. Dla subharmonicznej napięcia o częstotliwości  $f_{sh}=45 \text{ Hz}$  wartość subharmonicznej prądu jest znacznie mniejsza i wynosi jedynie  $I_{sh}=20,4 \text{ A}$ , tj. 3,8% składowej podstawowej. Wartość skuteczna prądu silnika w wyniku zasilania go napięciem odkształconym wzrasta z wartości  $376,1 \text{ A}$  do wartości  $412,9 \text{ A}$  w przypadku zasilania silnika napięciem zawierającym subharmoniczną o częstotliwości  $5 \text{ Hz}$ . Wzrost wartości prądu powoduje wzrost strat w uzwojeniach silnika.



Rys. 5. Amplituda subharmonicznej prądu odniesiona do harmonicznej podstawowej w funkcji częstotliwości subharmonicznej napięcia

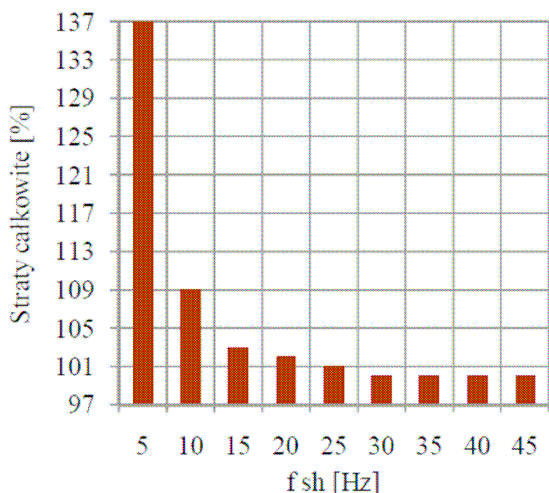
Na rys. 6 przedstawiono procentowy wzrost strat przewodowych, a na rys. 7 strat całkowitych, w porównaniu do strat przy zasilaniu napięciem nieodkształconym, w funkcji częstotliwości subharmonicznej napięcia. Dla subharmonicznej o częstotliwości  $f_{sh}=5 \text{ Hz}$  wzrost strat całkowitych wynosi ok. 37%. Jednocześnie należy nadmienić, że przyrost temperatury uzwojeń jest w przybliżeniu proporcjonalny do strat mocy.



Rys. 6. Straty przewodowe w funkcji częstotliwości subharmonicznej napięcia

W praktyce, tak znaczący wzrost strat może spowodować przegrzanie silnika i przyspieszone starzenie cieplne układu izolacyjnego.



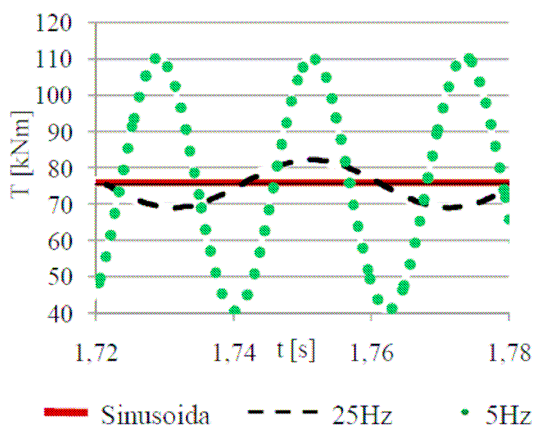


Rys. 7. Straty całkowite silnika w funkcji częstotliwości subharmonicznej napięcia

Kolejnym negatywnym skutkiem zasilania silnika napięciem odkształconym są wahania momentu obrotowego, które powodują drgania skrętne, a w skrajnym przypadku mogą prowadzić do uszkodzenia wału i sprzęgła [18].

Przebiegi momentów w przypadku zasilania silnika napięciem nieodkształconym oraz napięciem z zawartością subharmoniczną 25 Hz i 5 Hz przedstawiono na rys. 8.

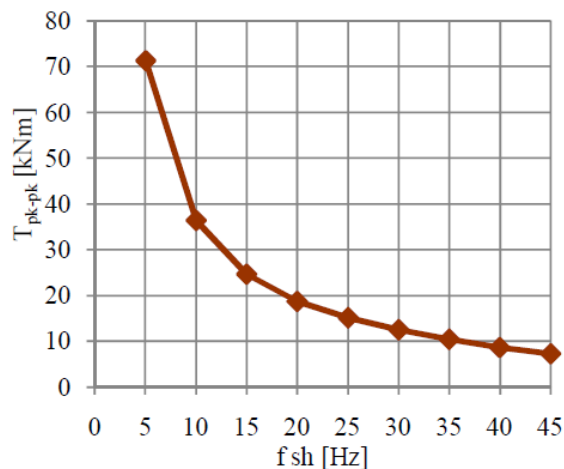
Wahania momentu elektromagnetycznego w czasie znacząco zależą od częstotliwości subharmonicznej napięcia. Na rys. 9 przedstawiono wartości międzyszczytowe momentu ( $T_{pk-pk}$ ) w funkcji częstotliwości subharmonicznej.



Rys. 8. Przebiegi momentu obrotowego dla napięcia nieodkształconego oraz wybranych częstotliwości subharmonicznej napięcia

Wartości międzyszczytowe zmieniają się od wartości 7,26 kNm dla częstotliwości  $f_{sh}=45$  Hz do wartości 71,23 kNm dla  $f_{sh}=5$  Hz. Wartość średnia momentu dla napięcia nieodkształconego wynosi 75,95 kNm.

Dla zasilania w pełni sinusoidalnego wartość międzyszczytowa przebiegu momentu wynosi 2,23 kNm.



Rys. 9. Wartości międzyszczytowe momentów elektromagnetycznych w funkcji częstotliwości subharmonicznej napięcia

Podsumowując, zasilanie silnika dużej mocy napięciem zawierającym subharmoniczne może powodować znaczące wahania momentu obrotowego oraz wzrost strat mocy.

#### 4. Wnioski

Rozważane zaburzenia spowodowały znaczące wahania momentu obrotowego oraz wzrost strat mocy silnika, szczególnie w przypadku subharmonicznych o częstotliwości mniejszej od 15 Hz. W rzeczywistych warunkach pracy, subharmoniczne o niskich częstotliwościach mogłyby doprowadzić do przegrzania i przedwczesnego zniszczenia silnika. Należy również zauważyć, że badany silnik jest znacznie bardziej wrażliwy na subharmoniczne napięcia niż silniki małej mocy [10] [12].

Ponadto istnieje zasadność prowadzenia dalszych prac badawczych dotyczących wpływu subharmonicznych na silniki indukcyjne dużej mocy. Ponieważ w przypadku takich maszyn badania eksperymentalne są bardzo utrudnione, dlatego – zdaniem autorów - najodpowiedniejszym narzędziem badawczym są metody polowe. Wyniki planowanych prac badawczych mogą przyczynić się do wyznaczenia dopuszczalnych poziomów subharmonicznych dla celów norm i przepisów dotyczących jakości napięcia.

#### 5. 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, pp. 1736-1740.
- [2]. Elvira-Ortiz, D. A., Osornio-Rios, R. A., Morinigo-Sotelo, D., Rostro-Gonzalez, H., Romero-Troncoso, R. J., "Power quality monitoring system under different environmental and electric conditions", *18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2018.
- [3]. Basic D., "Input current interharmonics of variable-speed drives due to motor current imbalance", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 25, no. 4, pp. 2797-2806, October 2010.
- [4]. Sürgevil, T., Akpınar, E., "Effects of electric arc furnace loads on synchronous generators and asynchronous motors", in Proc. of International Conference on Electrical and Electronics Engineering, pp. I-49 - I-53, Nov. 2009.
- [5]. Bollen M. H. J., Gu I. Y. H., "Signal processing of power quality disturbances", (Wiley, New York, 2006).
- [6]. Emanuel, A. E., Langella, R., Testa, A.: 'Limiting low frequency interharmonic distortion and voltage fluctuations', IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp.1-6, July 2010
- [7]. 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, pp.: 1207 – 1214, April 2008.
- [8]. 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 costs" *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, January/February 2002, pp. 12-20.
- [9]. Gnaciński P., Hallmann D. Badania wstępne silnika indukcyjnego zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne z wykorzystaniem metody polowej oraz polowo-obwodowej, *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni*, nr 106, s. 48-59, grudzień 2018
- [10]. Gnaciński P., Pepliński M., "Induction cage machine supplied with voltage containing subharmonics and interharmonics", *IET Electric Power Applications*, Volume 8, Issue 8, pp. 287-295, September 2014.
- [11]. Gnaciński P., Pepliński M., Szweda M., "Wpływ subharmonicznych i interharmonicznych napięcia na prądy w uzwojeniach silnika indukcyjnego", *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, nr 92/2011, s. 67-71, Katowice 2010.
- [12]. Gnaciński P., Pepliński M., Szweda M.: "Wpływ podharmonicznych na obciążenie cieplne silnika indukcyjnego", *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, nr 84/2009, s. 97-101, Katowice 2009
- [13]. Ghaseminezhad., M., Doroudi, A., Hosseinian, S. H. and Jalilian, A., "An Investigation of Induction Motor Saturation under Voltage Fluctuation Conditions", *Journal of Magnetism*, vol. 22(2), pp. 306-314, 2017.
- [14]. Ghaseminezhad, M., Doroudi, A., Hosseinian, S. H., & Jalilian, A.: 'Investigation of Increased Ohmic and Core Losses in Induction Motors Under Voltage Fluctuation Conditions', Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering, pp. 1-10, 2018.
- [15]. Zhao, K., Cheng, L., Zhang, C., Nie, D., Cai, W., "Induction motors lifetime expectancy analysis subject to regular voltage fluctuations", *In Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, IEEE, pp. 1-6, 2017.
- [16]. EN 50160, "Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution network.", 2010.
- [17]. Sprawozdanie nr 31/NZ/17 z próby silnika Sfw900HV8D prod. Zakładu Maszyn Elektrycznych "EMIT" S.A. Grupa Cantoni.
- [18]. Feese, T., & Maxfield, R., "Torsional vibration problem with motor/ID fan system due to PWM variable frequency drive". *In Proceedings of the 37th Turbomachinery Symposium*. Texas A&M University. Turbomachinery Laboratories, 2008.

#### Autorzy

dr hab. inż. Piotr Gnaciński, prof. UMG,  
Katedra Elektroenergetyki Okrętowej,  
Uniwersytet Morski, Gdynia  
ul. Morska 81-87,  
tel. +48 58 558 63 82,  
e-mail: p.gnacinski@we.umg.edu.pl

mgr inż. Piotr Klimczak, Biuro Diagnostyki  
i Serwisu Silników Elektrycznych, Zakład  
Maszyn Elektrycznych "EMIT" S.A. Grupa  
Cantoni, Żychlin,  
ul. Narutowicza 72, tel. + 48 24 285 47 13,  
e-mail: piotr.klimczak@cantonigroup.com