

Diagnostyka drganiowa generatorów wzbudzanych magnesami trwałymi – nowa metoda wykrywania drgań spowodowanych niewyważeniem

Streszczenie. Artykuł przedstawia nową wibracyjną metodę diagnostyczną dla generatorów z magnesami trwałymi, które są powszechnie wykorzystywane m.in. w małych elektrowniach wiatrowych. Wykorzystuje ona specyficzne właściwości konstrukcyjne maszyn z magnesami trwałymi, tj. indukowanie się SEM pod wpływem wibracji. W pracy poruszono szereg zagadnień, m.in. genezę powstania metody, podobieństwo maszyny z magnesami trwałymi do czujnika drgań, model obliczeniowy oraz zawartość wyników symulacji i badań laboratoryjnych. Metoda ta jest przedmiotem zgłoszenia patentowego nr P.405669.

Abstract. The paper presents a new vibration diagnostic method designed for diagnose of permanent magnets (PM) generators. Those machines are commonly used in small wind turbines. Specific structural properties of machines excited by permanent magnets are used in this method - electromotive force (EMF) generated due to vibrations. In this article several issues will be discussed: the method genesis, the similarity of permanent magnet machines to vibration sensor, mathematical model, and results of simulation and laboratory tests. The method is the subject of patent application No P.40566. (**Innovative vibration diagnostic method of permanent magnets generators – detecting of vibrations caused by unbalance.**)

Słowa kluczowe: generator, magnesy trwałe, diagnostyka, drgania.

Keywords: generator, permanent magnets, diagnostics, vibration.

doi:10.12915/pe.2014.06.45

Wstęp

Drgania w maszynach elektrycznych są zjawiskiem niepożądanym, ich wysoki poziom, wyższy od tzw. poziomu dopuszczalnego, jest uważany za symptom wystąpienia awarii. Zbagatelizowanie tych objawów pociąga za sobą realne ryzyko wystąpienia awarii katastrofalnej, której koszty wielokrotnie mogą przekroczyć koszt urządzenia. Drgania, które zawsze towarzyszą pracy maszyn wirujących są przyczyną stopniowej degradacji niektórych podzespołów urządzenia. Diagnostyka drganiowa ma za zadanie uzyskanie zbioru informacji dotyczących stopnia zużycia danych podzespołów. W zależności od celu pomiaru oraz typów badanych maszyn, podstawowe znaczenie mają przebiegi czasowe: przemieszczeń, prędkości lub przyspieszeń drgań. Dla ogólnej oceny maszyny wirującej istotną jest wartość skuteczna (RMS) prędkości drgań. Chcąc natomiast poznać ich przyczynę, konieczne jest przeprowadzenie szczegółowej analizy widma drgań. Zabieg taki pozwala na rozłożenie sygnału generowanego przez maszynę na składowe. Znając podstawowe parametry ruchowe maszyny oraz jej budowę można poszczególnym składowym widma drgań przypisać generujące je elementy lub stany pracy maszyny [2]. Diagnostyka drganiowa większości maszyn elektrycznych bazuje głównie na pomiarach przy użyciu zewnętrznych czujników pomiarowych oraz dedykowanej do tego celu skomplikowanej i kosztownej aparatury. W rozwiązaniach tych trzeba zwracać uwagę na możliwość zamontowania czujnika do maszyny, co często stwarza problemy, gdyż maszyna fabrycznie jest rzadko do tego celu przystosowana. Sposób montażu wpływa na pasmo przenoszonych częstotliwości sygnału pomiarowego. Dodatkowo należy zwracać szczególną uwagę na separację obwodu pomiarowego od wszelkiego rodzaju zakłóceń, które to mogą spowodować nieprawidłowe wskazania aparatury pomiarowej [3,4,5].

Zaletą opisywanego sposobu wykrywania drgań wzbudzanych przyczynami mechanicznymi w maszynach elektrycznych z magnesami trwałymi jest to, że układ pomiarowy nie wymaga stosowania czujników do pomiaru wibracji. Obwód wzbudzenia i uzwojenie twornika pełnią bowiem równocześnie funkcję czujnika pomiarowego drgań. Czujniki do pomiaru drgań stosuje się jednorazowo do skalowania pomiarów dla danego typu maszyny. Pomiar

wibracji tą metodą mogą być wykonywane on-line w czasie normalnej eksploatacji maszyny [6,7]. Opisywana metoda diagnostyczna maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi, o liczbie par biegunów p i pracujących z prędkością obrotową n , obejmuje rejestrację przebiegu czasowego napięcia lub prądu diagnozowanej maszyny, wykonanie analizy częstotliwościowej i wydzielenie częstotliwości f_1 oraz f_2 wg zależności (1) i (2):

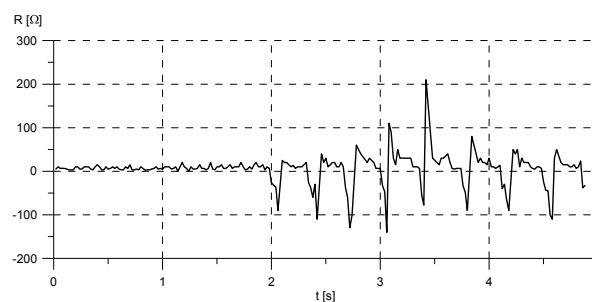
$$(1) \quad f_1 = \frac{(p-1)f}{p}$$

$$(2) \quad f_2 = \frac{(p+1)f}{p}$$

gdzie: f_1, f_2 – szukane częstotliwości, p – liczba par biegunów, f – częstotliwość pierwszej harmonicznej badanego generatora.

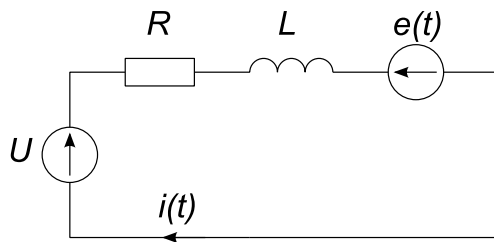
Geneza powstania metody

Idea wykorzystania generatora z magnesami trwałymi jako czujnika drgań pojawiła się przypadkiem. Podczas pomiarów rezystancji uzwojeń takich maszyn występowały zakłócenia (Rys.1.), które ujawniają się, gdy w otoczeniu badanej maszyny jest źródło drgań. Podczas pomiarów innych rodzajów maszyn zjawisko to nie występuje. Natomiast w maszynie z magnesami trwałymi podczas drgań w uzwojeniach indukuje się siła elektromotoryczna (SEM), która wprowadza zakłócenia i pomiar rezystancji nie jest możliwy. Stanowi to poważny problem, np. podczas rejestracji krzywej stygnięcia uzwojeń po próbie nagrzewania.



Rys.1. Zakłócenia w pomiarze rezystancji

Na rysunku 2 przedstawiono schemat zastępczy uzwojenia z SEM, która powoduje zakłócenia i sprawia, że nie możemy w tym konkretnym przypadku korzystać z pomiarów metodą techniczną przy użyciu klasycznych przyrządów pomiarowych.



Rys.2. Schemat układu z wykrzytym zakłóceniem podczas pomiaru rezystancji

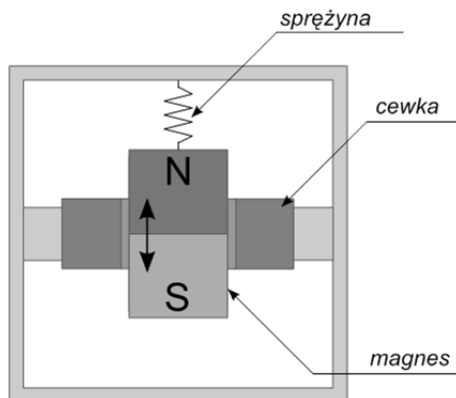
Opis parametrów schematu zastępczego:

- U – źródło napięcia stałego,
- R – rezystancja badanego uzwojenia,
- L – indukcyjność własna badanego uzwojenia,
- $e(t)$ – SEM indukowana przez drgania i zakłócająca pomiar,
- $i(t)$ – prąd płynący przez uzwojenie.

Generator wzbudzany magnesami trwałymi jako czujnik drgań

Analizując problem zakłóceń zauważono podobieństwo maszyny z magnesami trwałymi (PM) do czujnika elektrodynamicznego (Rys.3.), służącego do pomiaru drgań. Czujnik taki charakteryzuje się:

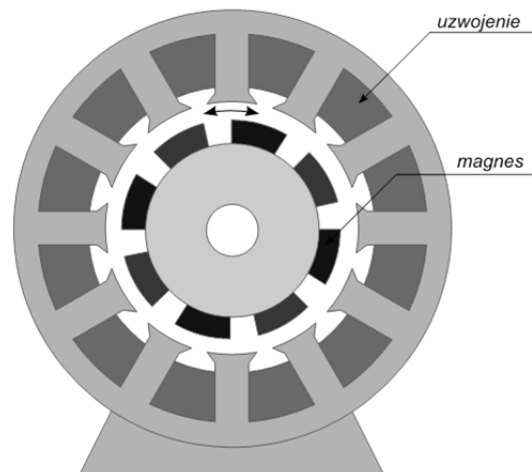
- prostą budową, a więc magnes zawieszony na sprężynie wewnątrz cewki. Pod wpływem wibracji magnes się przemieszcza i generuje w cewce sygnał proporcjonalny do prędkości drgań. Istnieją również konstrukcje gdzie cewka jest ruchoma, natomiast magnes jest przymocowany na sztywno do obudowy,
- czułością zależną od liczby zwojów w cewce,
- brakiem zasilania napięciem ze źródła zewnętrznego.



Rys.3. Czujnik elektrodynamiczny

Porównując maszynę z magnesami trwałymi (Rys.4.) do czujnika elektrodynamicznego (Rys.3.) można zauważyć:

- podobną budowę – magnesy trwałe oraz uzwojenie, czyli cewka. Pod wpływem wibracji generuje się SEM, a więc sygnał który można wykorzystać do analizy drgań,
- większa liczba zwojów oraz par biegunów indukuje większy sygnał pomiarowy, a więc czułość jest zależna od liczby zwojów uzwojenia – analogicznie jak w czujniku elektrodynamicznym.



Rys.4. Maszyna z magnesami trwałymi

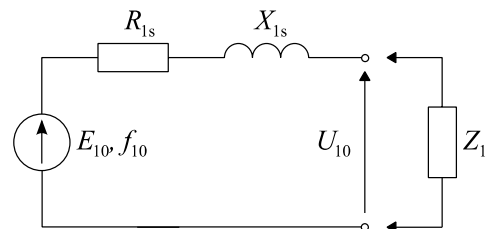
Źródła harmonicznych w maszynie z magnesami trwałymi

Poniżej przedstawiono ważniejsze źródła harmonicznych, które możemy zaobserwować w wyindukowanym napięciu lub prądzie:

- źródła harmonicznych, które można wyeliminować lub ograniczyć w dużym stopniu na etapie projektowania maszyny:
 - niewłaściwie dobrany współczynnik uzwojenia,
 - źle dobrana liczba żłobków w maszynie,
 - asymetria szczeliny powietrznej wynikająca z tolerancji technologicznych,
 - nieliniowa charakterystyka magnesowania,
- źródła harmonicznych mogące się ujawnić podczas eksploatacji maszyny:
 - niewywaga,
 - asymetria geometrii promieniowej lub osiowej między stojanem a wirnikiem,
 - uszkodzenie łożyska.

Symulacje komputerowe oraz wyniki badań laboratoryjnych generatora PM z niewywagą jako źródło drgań

Model fizyczny do analizy drgań opracowano korzystając ze schematu zastępczego przedstawionego na rysunku 5, którego poszczególne parametry wyznaczono metodą obwodową wykorzystując zależności analityczne oraz dane konstrukcyjne maszyny [8].



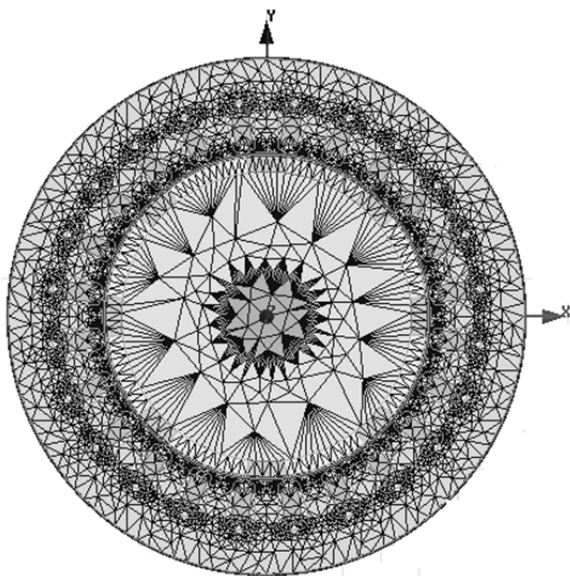
Rys.5. Schemat zastępczy jednej fazy generatora PM

Parametry schematu zastępczego:

- E_{10} – siła elektromotoryczna rotacji pochodząca od magnesów trwałych,
- f_1 – częstotliwość generowanego napięcia,
- R_{1s} – rezystancja fazowa uzwojenia twornika (stojana),
- X_{1s} – reaktancja synchroniczna uzwojenia stojana,
- U_{10} – napięcie biegu jałowego,
- Z_1 – impedancja obciążenia,

Symulacje oraz badania laboratoryjne przedstawione w artykule zrealizowano dla generatora PMGhR90X – 6M, o parametrach: $U_N = 40\text{ V}$, $I_N = 17,2\text{ A}$, $P_N = 1,2\text{ kW}$, $n_N = 1000\text{ 1/min}$. Jest to generator przeznaczony dla małych elektrowni wiatrowych.

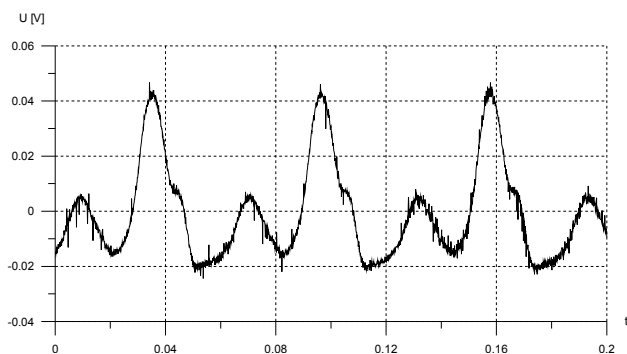
Symulacje komputerowe przeprowadzono na modelu polowym (Rys.6.) w środowisku Ansys Maxwell 2D. Jego działanie opiera się na metodzie elementów skończonych. Wyniki symulacji obrazują wpływ wibracji na SEM indukowaną w uzwojeniu generatora PM [9].



Rys.6. Model polowy generatora

Wynikiem symulacji jest napięcie wyindukowane w uzwojeniu generatora znajdującego się w obszarze oddziaływania drgań. Zostało ono poddane analizie częstotliwościowej, której celem było wyselekcjonowanie poszukiwanych harmonicznych odpowiadających poszczególnym stanom niepożądanym w maszynie elektrycznej.

Aby odwzorować oddziaływanie wibracji na generator z magnesami trwałymi należało wyznaczyć funkcję opisującą ruch wirnika, znajdującego się pod ich działaniem.

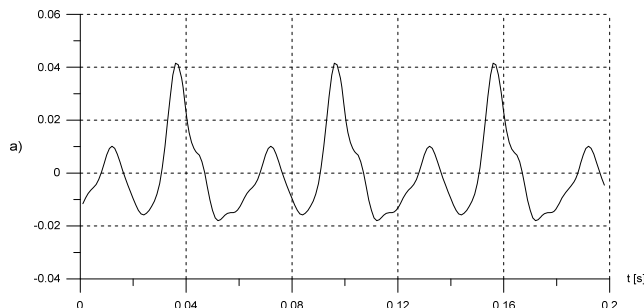


Rys.7. Napięcie indukowane w uzwojeniu nie napędzanego generatora – wyniki badań laboratoryjnych.

Dokonano tego poprzez badania nienapędzanego generatora umieszczonego na wspólnej ramie z silnikiem indukcyjnym posiadającego tę samą liczbę par biegunów oraz zamontowaną niewywagę na wale. Silnik spowodował wymuszenie drgań generatora z magnesami trwałymi i wyindukowanie się SEM w uzwojeniu. Zarejestrowane

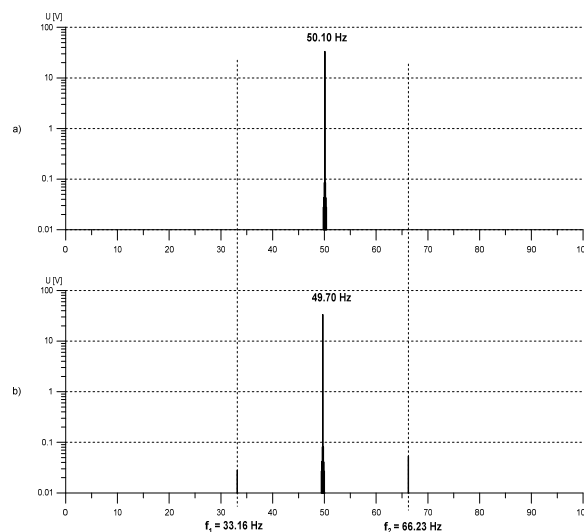
napięcie przedstawiono na rysunku 7. Pozwoliło to zamodelować funkcję opisującą ruch wirnika, która została zaimplementowana w model połowy maszyny, celem sprawdzenia poprawności odwzorowania.

Na rysunku 8 przedstawiono wyniki symulacji powyższej próby. Jak można zaobserwować wyindukowane rzeczywiste napięcie pokrywa się w dużym stopniu z wynikiem symulacji. Metoda doboru funkcji opisującej ruch wirnika wynikający z występowania wibracji stworzona została poprawnie.



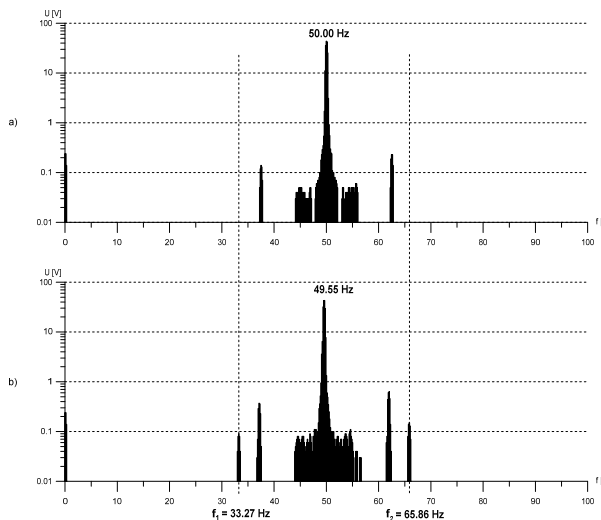
Rys.8. Napięcie indukowane na zaciskach nie napędzanego generatora – wyniki symulacji.

Korzystając z zależności (1) oraz (2) wyznaczono częstotliwości f_1 i f_2 dla badanego generatora, które odpowiadają stanowi niewyważenia maszyny. Następnie przeprowadzono analizę częstotliwościową sygnału napięciowego powstałego w wyniku symulacji oraz rzeczywistego wyindukowanego przez napędzany generator. Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono badania oraz symulacje weryfikujące zastosowanie nowej metody do wykrywania niewyważień mogących powstać podczas eksploatacji maszyn z magnesami trwałymi. Drgania generowano poprzez umieszczenie na wale niewywagi. Na rysunku 9 pokazano powstałe w wyniku symulacji widmo częstotliwościowe napięcia wytworzonego przez generator napędzany z prędkością znamionową. W przypadku „a” rozpatrywano generator w niezakłóconym stanie pracy. Natomiast w przypadku „b” generator posiadał niewywagę umieszczoną na wale napędowym. Na obu rysunkach zaznaczono częstotliwość podstawową f oraz częstotliwości f_1 , f_2 .



Rys.9. Widmo częstotliwościowe napięcia indukowanego na zaciskach generatora – wyniki symulacji.

Natomiast na rysunku 10 analogicznie przedstawiono widmo częstotliwościowe rzeczywistego napięcia zmierzonego na zaciskach generatora napędzanego z prędkością znamionową. Widmo częstotliwościowe obiektu rzeczywistego różni się od tego z symulacji ze względu na to, że w modelu symulacyjnym zakłada się maszynę idealną, w pełni symetryczną, co w rzeczywistości jest niemożliwe do uzyskania. Pasma częstotliwości, wokół częstotliwości podstawowej 50 Hz, zawiera zbiór częstotliwości dodatkowych. Porównując rysunki 10„a” i 10„b” widać dodatkowe „prążki” częstotliwości, które wzbudziła niewyważa. Ich częstotliwości odpowiadają częstotliwościom wyliczonym drogą symulacyjną i obliczeniową – tabela 1.



Rys.10. Widmo częstotliwościowe napięcia indukowanego na zaciskach generatora – wyniki badań.

Tabela 1 Porównanie wyników symulacji oraz badań laboratoryjnych.

	f [Hz]	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]
Zależności (1) oraz (2)	50.00	33.33	66.67
	49.70	33.13	66.27
	49.55	33.03	66.07
Symulacje	49.70	33.16	66.23
Badania laboratoryjne	49.55	33.27	65.86

Podsumowanie

Przeprowadzone obliczenia, symulacje oraz badania pokazują skuteczność przedstawionej nowej wibracyjnej metody diagnostycznej dla generatorów z magnesami trwałymi, gdzie drgania powstały na skutek niewyważa. Przeprowadzona analiza pokazuje możliwość wykorzystania maszyny z magnesami trwałymi jako czujnik drgań dla samej siebie. Jest to podejście innowacyjne i niestandardowe. Autor nigdzie nie napotkał takiego zastosowania dla generatorów PM, gdzie do oceny stanu technicznego pod względem drgań wykorzystuje się sygnał własny maszyny [1]. Przedstawiona metoda diagnostyczna zdaniem autora, który na co dzień zajmuje się badaniem maszyn w laboratorium, jak również diagnostyką maszyn elektrycznych eksploatowanych w przemyśle, znacznie upraszcza diagnostykę drganiową w maszynach PM [10].

Sprawia, iż nie jest wymagane stosowanie kosztownych czujników pomiarowych oraz diagnosta nie przejmuje się ich montażem, co w niektórych przypadkach stanowi istotny problem. Metoda pozwala również na diagnostykę on – line, przy użyciu dodatkowego oprzyrządowania pozwalającego na analizę częstotliwościową sygnału napięciowego lub prądowego eksploatowanego napędu [6,7]. Jest to dosyć istotne dla elektrowni wiatrowych do których dostęp jest z różnych powodów utrudniony [11]. Pozostałe źródła harmonicznych w maszynach elektrycznych z magnesami trwałymi zostaną przeanalizowane przez autora w następnych pracach.

Praca finansowana ze środków na naukę w latach 2013-2015 jako projekt badawczy nr 413/L-4/2012 realizowany w Instytucie Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL o nazwie „Wibroakustyczna metoda diagnostyczna silników trakcyjnych i generatorów z magnesami trwałymi na podstawie sygnałów własnych”.

LITERATURA

- [1] Barański M., Glinka T., *Sposób diagnozowania drgań wzbudzanych niewyważą w maszynach elektrycznych z magnesami trwałymi*, Zgłoszenie patentowe P.405669
- [2] Barański M., *Wieloosiowy analizator drgań z wykorzystaniem modułu SV06A, karty pomiarowej Personal Daq 3001 oraz graficznego środowiska programowania LabView*, Diploma, 2010
- [3] Barański M., Decner A., A.Polak, *Diagnostyka drganiowa węzłów łożyskowych w oparciu o hodograf xy*, Przegląd Elektrotechniczny, 1/2014
- [4] Barański M., Decner A., *Funkcja przyspieszenia drgań $a_y = f(a_x)$ jako narzędzie do określania stanu technicznego łożyska*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 2011
- [5] Lakshmikanth S., Natraj K.R., Rekha K.R., *Noise and Vibration Reduction in Permanent Magnet Synchronous Motors – A Review*, International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2012
- [6] Decner A., *Zdalne monitorowanie maszyn elektrycznych*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 2011
- [7] Barański A., Decner A., *Telemetria w Diagnostowaniu Maszyn Elektrycznych*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 2012
- [8] Pistelok P., Kądziołka T., *Nowa seria wysokosprawnych dwubiegunowych generatorów synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 100/2013 cz.2
- [9] Torregrossa D., *Multiphysics Finite-Element Modeling for Vibration and Acoustic Analysis of Permanent Magnet Synchronous Machine*, IEEE Transactions On Energy Conversion, 2011
- [10] Islam R., *Analytical Model for Predicting Noise and Vibration in Permanent-Magnet Synchronous Motors*, IEEE Transactions On Industry Applications, 2010
- [11] Nandi S., Toliyat H.A., *Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines-a review*, Industry Applications Conference, 1999

Autor: mgr inż. Marcin Barański, Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Al. Roździeńskiego 188, 40 - 203 Katowice, E-mail: m.baranski@komel.katowice.pl