

Marcin Barański

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

BEZCZUJNIKOWA DIAGNOSTYKA WIBRACYJNA MASZYN Z MAGNESAMI TRWAŁYMI BAZUJĄCA NA SYGNAŁACH WŁASNYCH

SENSORLESS VIBRATION DIAGNOSTIC OF PM MACHINES BASED ON THE OWN SIGNALS

Streszczenie: Większość badań mających na celu detekcję drgań w maszynie elektrycznej opiera się głównie na wykorzystaniu zewnętrznych czujników wraz z dedykowaną, skomplikowaną aparaturą. Dlatego największą zaletą opisywanej w artykule metody diagnostycznej jest to, że układ pomiarowy nie potrzebuje zewnętrznych czujników drgań. Magnesy trwałe oraz uzwojenie pełnią równocześnie funkcję czujnika drgań. Sposób diagnostyki wykorzystuje specyficzne właściwości konstrukcyjne maszyn z magnesami trwałymi, tj. indukowanie się SEM pod wpływem wibracji. Jest to podyktowane tym, że maszyna elektryczna ze wzbudzeniem od magnesów trwałych jest bardzo podobna do elektrodynamicznego czujnika drgań, którego działanie opiera się na tym, że pod wpływem drgań przemieszczający się magnes, indukuje napięcie wewnątrz cewki zależne od poziomu wibracji. W maszynie PM, wirnik z magnesami trwałymi pod wpływem drgań generuje SEM w uzwojeniu. Zarówno czujnik, jak i maszyna do generacji sygnału pomiarowego nie potrzebują zewnętrznych źródeł zasilania. Czułość układu w obu przypadkach jest zależna od ilości zwojów uzwojenia. Metoda opiera się na tym, iż przebieg napięcia, bądź prądu maszyny poddaje się analizie częstotliwościowej, która pozwala na określenie częstotliwości ściśle związanych ze zwiększeniem się poziomu drgań wzbudzonych konkretnym stanem niepożądanym w maszynie. Opracowanie metody było celem projektu „Wibroakustyczna metoda diagnostyczna silników trakcyjnych i generatorów z magnesami trwałymi na podstawie sygnałów własnych” realizowanego w ramach programu LIDER.

Abstract: Majority of electrical machines vibration diagnostic is based on measurements which are done with external sensors connected to dedicated for this purpose complicated and expensive meters or analyzers. The main advantage of the described method of detecting vibrations in electrical machines with permanent magnets is that the measurement system does not require to use an external sensors for measuring vibration. Excitation circuit and armature winding perform a function of the vibration sensor at the same time. Specific structural properties of machines excited by permanent magnets are used in this method - electromotive force (EMF) generated due to vibrations. PM machine is similar to electro-dynamic sensor of vibration. In the sensor permanent magnet moves inside the coil and generates a voltage on terminals of the coil. The voltage signal is proportional to vibrations. In the PM machine, the rotor with permanent magnets generated the EMF if is exposed to the vibrations. The supply is no required for the sensor and machine. The sensitivity depends on the number of turns in the coil in both of cases. The method based on frequency analysis of voltage or current of tested machine. This analysis allows to determine the frequency closely related to increased level of vibration, excited a particular undesirable state of the machine. Description of method was the aim of “Vibroacoustic diagnostic method of traction permanent magnets motors and generators based on the own signals“ project realized in LIDER program.

Słowa kluczowe: *maszyna elektryczna, magnesy trwałe, diagnostyka, drgania*

Keywords: *electrical machine, permanent magnets, diagnostics, vibration*

1. Wstęp

Celem projektu było opracowanie wibroakustycznej metody diagnostycznej silników trakcyjnych oraz generatorów ze wzbudzeniem od magnesów trwałych bazującej na tzw. sygnałach własnych. Diagnostyka wibracyjna w oparciu o te sygnały sprawia, że diagnozowana maszyna może być sama dla siebie czujnikiem drgań. Podstawową zaletą powstałej metody jest możliwość jej stosowania w warunkach przemy-

słowych, bez stosowania dodatkowego oprzyrządowania (montażu czujników itp.) [1] – [4]. Poprzez wykonanie modeli symulacyjnych, symulacji komputerowych oraz badań laboratoryjnych został wyselekcjonowany obszar diagnostyczny mający znaczenie w maszynach ze wzbudzeniem od magnesów trwałych. Projekt pozwolił na zbadanie zjawiska generacji wibracji oraz emisji hałasu towarzyszących rze-

czonym maszynom. Wykonane elementy maszyn pozwoliły na analizę szeregu problemów, które objawiają się zwiększoną emisją wibroakustyczną. Poprzez zmiany konfiguracyjne wykonanych stojanów oraz wirników zobrażwane zostały np. wpływ ekscentryczności, czy też asymetrii obciążenia na wzrost wartości generowanych drgań i hałasu.

2. Maszyny modelowe

W ramach projektu opracowano konstrukcje modelowych maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi i przeprowadzono ich badania symulacyjne i stanowiskowe. Celem badań było określić wpływ momentu zaczepowego oraz różnych rodzajów asymetrii szczeliny powietrznej na drgania. Modele maszyn obejmowały dokumentację wariantowych rozwiązań konfiguracyjnych czterech stojanów i sześciu wirników. Badania symulacyjne i stanowiskowe przeprowadzono przy pracy generatorowej i silnikowej, w tym przy symetrycznym i niesymetrycznym obciążeniu bądź zasilaniu. Modele fizyczne maszyn zostały wykonane ze wzniósem 132. Stojany posiadają następujące parametry:

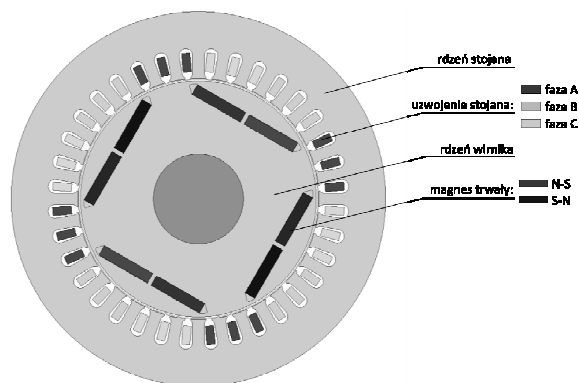
- dwa z uzwojeniami umożliwiającymi uzyskanie różnej liczby par biegunów ($2p=4$ oraz $2p=12$), ale jeden pakiet posiada skos, drugi wykonany jest bez skosu, liczba żłobków – 36,
- jeden stojan ($2p=4$) ze skosem, liczba żłobków – 48,
- jeden stojan ($2p=4$) ze skosem, liczba żłobków – 60.

Wirniki posiadają następujące parametry:

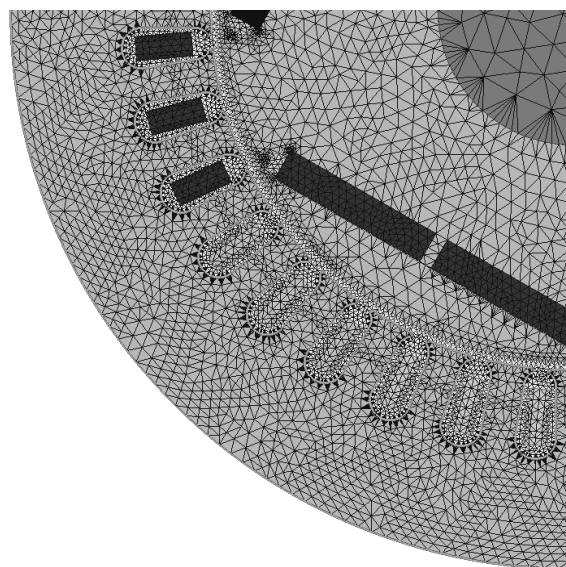
- dwa wirniki SPM ze skosem naklejonych magnesów, ale z różną liczbą par biegunów ($2p=4$ oraz $2p=12$),
- jeden wirnik ($2p=4$) SPM z prosto naklejonymi magnesami,
- jeden wirnik ($2p=4$) IPM z magnesami umieszczonymi w kształcie litery V,
- dwa wirniki ($2p=4$) IPM z prostymi magnesami, ale jeden ze skosem, drugi bez.

3. Model symulacyjny

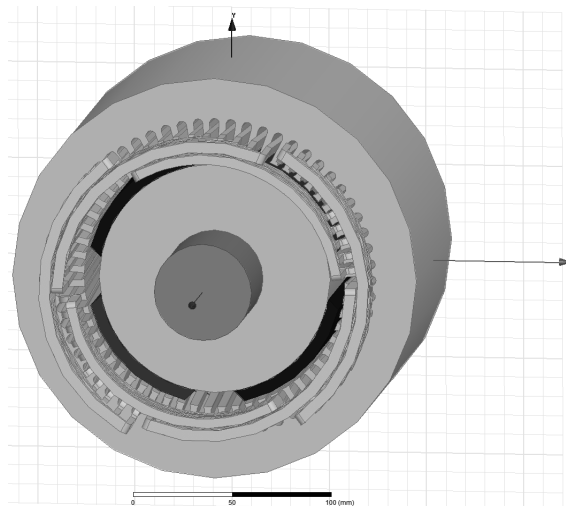
W ramach realizacji projektu powstało kilkanaście modeli dwu- i trójwymiarowych w środowisku Ansys Maxwell oraz Autodesk Simulation Multiphysics [5]. Przykłady zaprezentowano na rysunkach poniżej (Rys.1 – Rys.5).



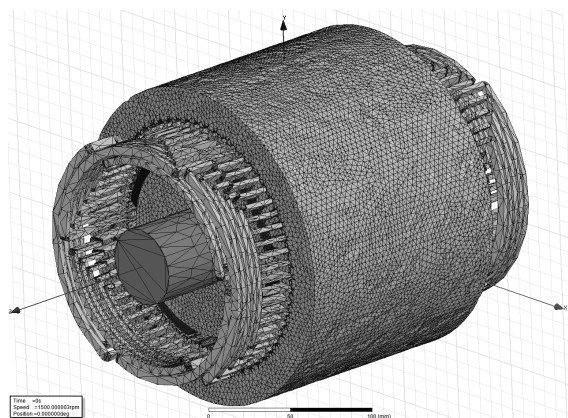
Rys. 1. Przykładowy model 2D maszyny PM z wyróżnieniem elementów



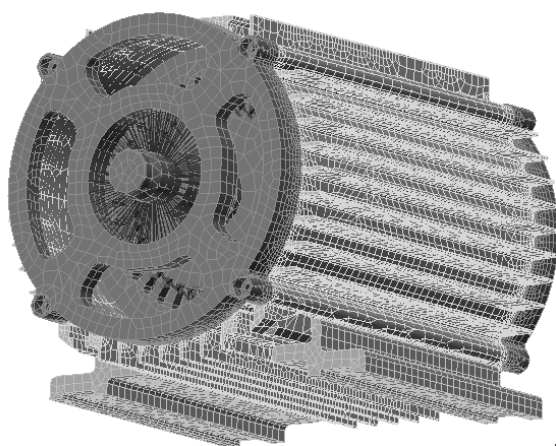
Rys. 2. Siatka elementów skończonych – 1/4 obwodu



Rys. 3. Model 3D maszyny z magnesami trwałymi



Rys. 4. Siatka elementów skończonych w modelu 3D

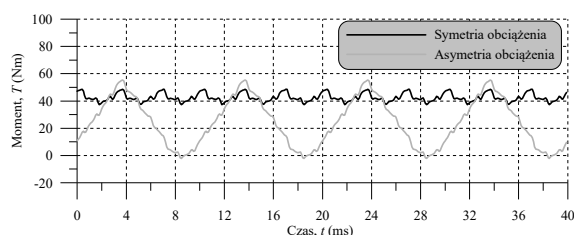


Rys. 5. Model obliczeniowy opracowany w programie Autodesk Simulation Multiphysics

4. Symulacje komputerowe

Wykorzystując opracowane modele przeprowadzono symulacje komputerowe przy użyciu Metody Elementów Skończonych. Rozpatrywano wpływ asymetrii szczeliny powietrznej, asymetrii obciążenia i zasilania maszyny na poziom wibracji oraz hałasu.

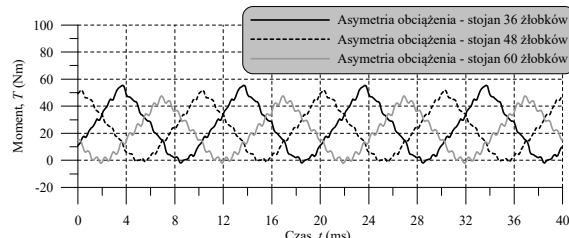
Poniżej na Rys.6 przedstawiono przykładowe wyniki symulacji maszyny z magnesami trwałymi w reżimie pracy generatorowej dla dwóch stanów pracy: symetria i asymetria obciążenia.



Rys. 6. Przebieg czasowy momentu generatora PM w różnych stanach obciążeniowych

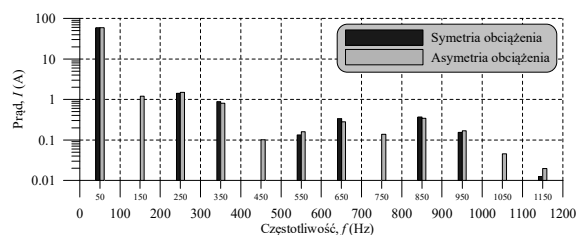
Dla asymetrii obciążenia zaobserwować można znaczne zwiększenie pulsacji momentu, co bezpośrednio przekłada się na zwiększenie poziomu wibracji w maszynie.

Na Rys.7 zobrazowano wpływ większej liczby żłobków w stojanie na pulsacje momentu przy asymetrii obciążenia.

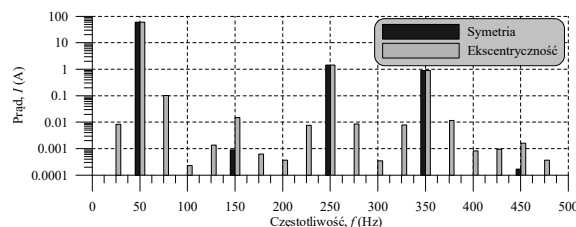


Rys. 7. Przebieg czasowy momentu generatora PM przy asymetrycznym obciążeniu dla stojanów z różną liczbą żłobków

Na Rys.8 oraz Rys.9 przedstawiono przykładowe wyniki analizy częstotliwościowej prądu otrzymanego w wyniku symulacji zaprojektowanych maszyn z magnesami trwałymi. Można porównać widmo prądu generatora obciążonego symetrycznie i asymetrycznie, jak również porównać widmo prądu maszyny z symetryczną szczeliną powietrzną oraz maszyny z ekscentrycznością. Na przedstawionych wykresach zauważyć można wzrost poziomu niektórych częstotliwości w stanach niepożądanych, co może być wykorzystane do diagnostyki oraz monitoringu.



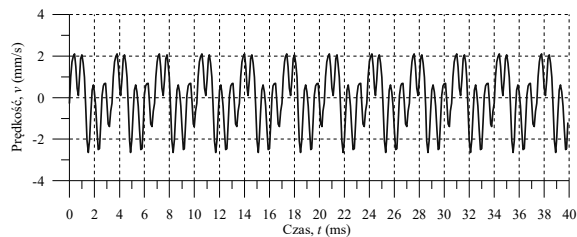
Rys. 8. Widmo prądu generatora w stanie symetrycznego i asymetrycznego obciążenia



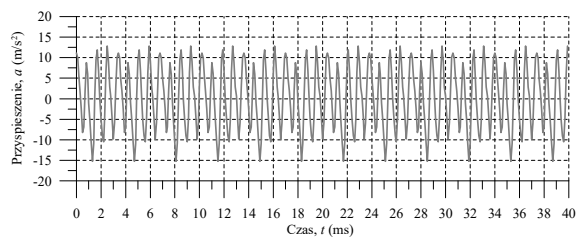
Rys. 9. Widmo prądu generatora z symetryczną szczeliną powietrzną oraz z ekscentrycznością

Na Rys.10 i Rys.11 przedstawiono przykładowe wyniki symulacji maszyny z magnesami trwałymi przeprowadzone w środowisku Autodesk Simulation Multiphysics. Na ilustracjach

przedstawiono wyniki naprężenia, prędkości oraz przyspieszenia drgań.

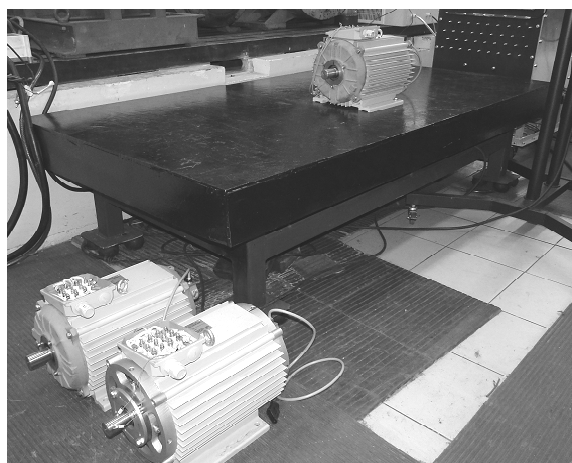


Rys. 10. Przebiegi prędkości drgań w generatorze PM przy znamionowym obciążeniu



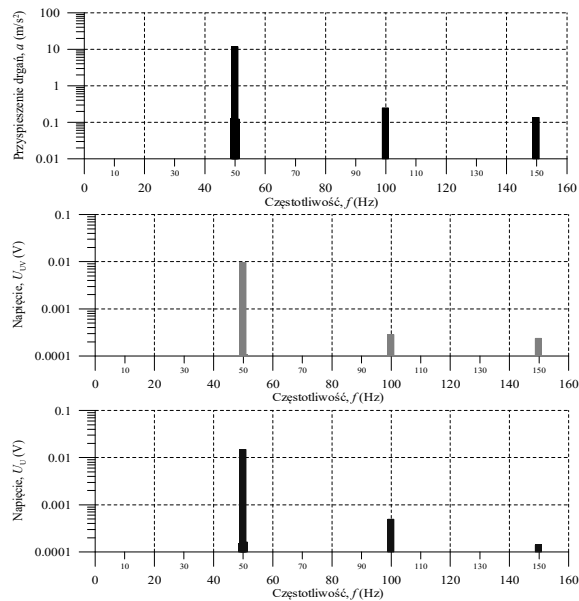
Rys. 11. Przebiegi przyspieszenia drgań w generatorze PM przy znamionowym obciążeniu

5. Badania statyczne



Rys. 12. Badania jednej z maszyn PM na stole wibracyjnym

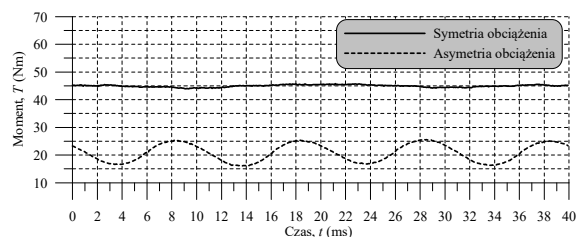
Badania statyczne zostały przeprowadzone na stole wibracyjnym (Rys.12). Analiza wyników jednej z maszyn zamieszczona na Rys. 13 pozwala zaobserwować, iż harmoniczne sygnałów własnych maszyny w dużej mierze odpowiadają harmonicznemu sygnałowi pochodzącego z czujnika przyspieszenia drgań (amplituda wymaga indywidualnego wyskalowania). Świadczy to o tym, że maszyna z magnesami trwałymi może zostać użyta do diagnostyki drganiowej poprzez analizę częstotliwościową jej sygnałów własnych [6], [7].



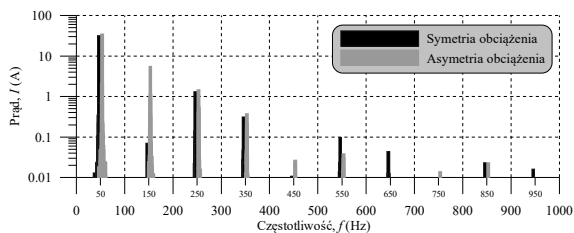
Rys. 13. Analiza częstotliwościowa przyspieszenia i napięć U_{UV} oraz U_u maszyny z magnesami trwałymi – wyniki badań na stole wibracyjnym

6. Badania laboratoryjne w reżimie pracy generatorowej

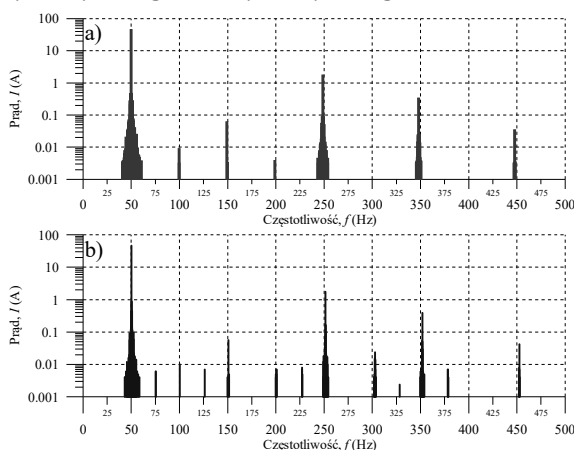
Przeprowadzono badania laboratoryjne wykonanych maszyn z magnesami trwałymi w reżimie pracy generatorowej. Przeanalizowano wpływ asymetrii szczeliny powietrznej oraz asymetrii obciążenia generatora. Poniżej na Rys.14 przedstawiono przebieg czasowy momentu przy symetrycznym i niesymetrycznym obciążeniu jednego z wykonanych generatorów PM. Można zaobserwować (analogicznie, jak przy symulacjach) pojawienie się pulsacji momentu przy asymetrii obciążenia, co bezpośrednio przekłada się na wzrost poziomu wibracji maszyny. Na Rys.15 przedstawiono widma prądu jednej z maszyn dla różnych stanów obciążenia. Natomiast na Rys.16 przedstawiono analizę prądu dla maszyny z symetryczną szczeliną powietrzną oraz z ekscentrycznością. Można zauważyć, że w obu przypadkach w stanach niepożądanych następuje wzrost niektórych częstotliwości – analogicznie, jak przy symulacjach komputerowych.



Rys. 14. Przebieg momentu generatora PM w różnych stanach obciążeniowych



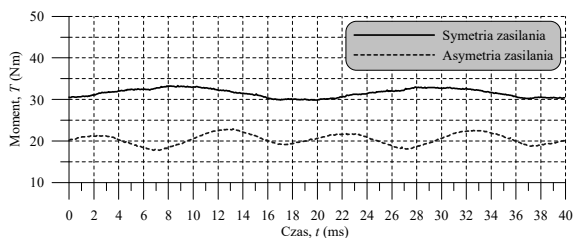
Rys. 15. Widmo prądu generatora w stanie symetrycznego i niesymetrycznego obciążenia



Rys. 16. Widmo prądu generatora z symetryczną szczeliną powietrzną (a) oraz z ekscentrycznością (b)

7. Badania laboratoryjne w reżimie pracy silnikowej

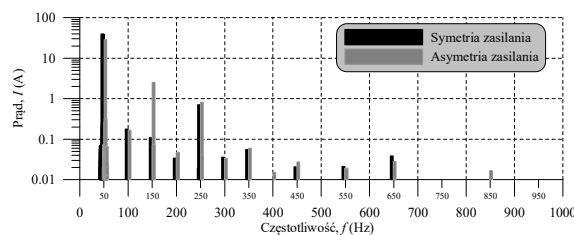
Przeprowadzono badania laboratoryjne wykonanych maszyn z magnesami trwałymi w reżimie pracy silnikowej. Przeanalizowano wpływ asymetrii szczeliny powietrznej oraz asymetrii zasilania silnika. Poniżej na Rys.17 przedstawiono przebieg czasowy momentu przy symetrycznym i niesymetrycznym zasilaniu jednego z silników PM.



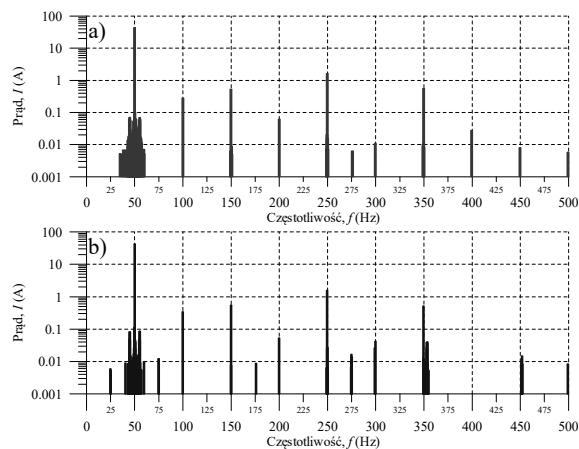
Rys. 17. Przebieg momentu silnika PM w różnych stanach zasilania

Można zaobserwować wzrost pulsacji momentu przy asymetrii zasilania, co bezpośrednio przekłada się na wzrost poziomu wibracji maszyny. Na Rys.18 przedstawiono widma prądu jednej z maszyn dla różnych stanów zasilania. Natomiast na Rys.19 przedstawiono analizę prądu dla maszyny z symetryczną szczeliną powietrzną oraz z ekscentrycznością. Można za-

uważyć, że w obu przypadkach w stanach niepożądanych następuje wzrost niektórych częstotliwości – analogicznie, jak w reżimie pracy generatorowej oraz symulacjach.



Rys. 18. Widmo prądu silnika w stanie symetrycznego i niesymetrycznego zasilania



Rys. 19. Widmo prądu silnika z symetryczną szczeliną powietrzną (a) oraz z ekscentrycznością (b)

8. Podsumowanie

Autorowi udało się wyselekcjonować i opisać równaniami matematycznymi poszczególne harmoniczne, których wzrost stanowi swego rodzaju marker dla określonych stanów niepożądanych w maszynach elektrycznych z magnesami trwałymi.

- niewyważenie – zgłoszenie patentowe nr P.40566, pt. „Sposób diagnozowania drgań wzbudzanych niewyważą w maszynach elektrycznych z magnesami trwałymi” [8],

$$f_1 = \frac{(p-1)f}{p} \quad f_2 = \frac{(p+1)f}{p}$$

- asymetria obciążenia generatora PM lub zasilania silnika PM – zgłoszenie patentowe nr P/411942, pt. „Sposób diagnozowania drgań wzbudzanych asymetrią obciążenia w prądnicach elektrycznych z magnesami trwałymi” [9], [10],

$$f_k = (2k-1) \frac{np}{20}$$

- ekscentryczność,

$$f_{k1} = k \cdot f - \frac{(p-1)f}{p} \quad f_{k2} = 2k \cdot f$$

gdzie: f_1, f_2 – szukane częstotliwości, f_{k1}, f_{k2} – szukane częstotliwości dla k-tej harmonicznej, f_k – szukane k-te harmoniczne, f – częstotliwość pierwszej harmonicznej badanego generatora, p – liczba par biegunów, k – liczba naturalna, n – prędkość obrotowa.

Autor nie napotkał takiego rozwiązania, gdzie dla maszyn z magnesami trwałymi do celów diagnostyki drganiowej wykorzystuje się sygnały własne [11] – [15]. Jest to podejście innowacyjne i niestandardowe. Przedstawione rozwiązanie znacznie upraszcza diagnostykę drganiową w maszynach PM. Sprawia, iż nie jest wymagane stosowanie kosztownej aparatury i czujników pomiarowych oraz diagnosta nie przejmuje się ich montażem, co w niektórych przypadkach stanowi istotny problem. Metoda pozwala również, przy użyciu dodatkowego oprzyrządowania, na diagnostykę on – line eksploatowanego napędu. Jest to dosyć istotne dla napędów, do których dostęp jest z różnych powodów utrudniony [16].

Przeprowadzone badania wskazują na możliwość wykorzystania maszyny z magnesami trwałymi jako czujnik drgań dla samej siebie. Praca finansowana była 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”.

9. Literatura

- [1]. Barański M.: *Nowa metoda wykrywania drgań spowodowanych niewyważą – diagnostyka generatorów z magnesami trwałymi*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, 2014.
- [2]. Barański M.: *Diagnostyka drganiowa generatorów wzbudzanych magnesami trwałymi – nowa metoda wykrywania drgań spowodowanych niewyważą*, Przegląd Elektrotechniczny, 2014.
- [3]. Barański M.: *Vibration diagnostic method of permanent magnets generators – detecting of vibrations caused by unbalance*, IEEE Xplore, 2014.
- [4]. Barański M.: *New vibration diagnostic method of PM generators and traction motors – detecting of vibrations caused by unbalance*, IEEE Xplore, 2014.
- [5]. Barański M.: Będkowski B., *Electrical machine with permanent magnets as a vibration sensor*, IEEE Xplore, 2014.

- [6]. Barański M., Jarek T.: *Analysis of PMSM vibrations based on Back-EMF measurements*, IEEE Xplore, 2014.
- [7]. Barański M., Decner A., Polak A.: *Selected Diagnostic Methods of Electrical Machines Operating in Industrial Conditions*, IEEE TDEI, 5/2014.
- [8]. Barański M., Glinka T.: *Sposób diagnozowania drgań wzbudzanych niewyważą w maszynach elektrycznych z magnesami trwałymi*, Zgłoszenie patentowe P.405669.
- [9]. Barański M.: *Problem drgań w generatorach wzbudzanych magnesami trwałymi przy pracy z asymetrycznym obciążeniem – analiza sygnałów własnych*, Przegląd Elektrotechniczny, 11/2015.
- [10]. Barański M., Glinka T.: *Sposób diagnozowania drgań wzbudzanych asymetrią obciążenia w prądnicach elektrycznych z magnesami trwałymi*, Zgłoszenie patentowe P. 411942.
- [11]. Szymaniec S.: *Pomiary częstotliwości drgań własnych i rezonansowych maszyn elektrycznych w warunkach ich eksploatacji*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, 3/2012.
- [12]. Szymaniec S.: *Ścieżki pomiarowe do pomiarów drgań względnych w maszynach elektrycznych*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, 81/2009.
- [13]. Szymaniec S.: *Pomiary drgań względnych w silnikach elektrycznych*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, 82/2009.
- [14]. Szymaniec S.: *Drgania własne stojana silnika indukcyjnego klatkowego małej mocy – pomiary*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, 3/2012.
- [15]. Szymaniec S., Podhajecki J.: *Wyznaczanie drgań własnych stojana silnika indukcyjnego*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, 87/2010.
- [16]. Decner A.: *Zdalne monitorowanie maszyn elektrycznych*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, 2011.