

Badania diagnostyczne silnika reluktancyjnego

Streszczenie. Niniejsza praca przedstawia wyniki badań diagnostycznych wykonanych na silniku reluktancyjnym. Polegały one na zadawaniu na stanowisku badawczym uszkodzeń niewyważenia wirnika i ekscentryczności dynamicznej w silniku. Sygnałem mierzonym było przyspieszenie (drgania) obiektu oraz prąd fazowy. Wyznaczone zostały widma tych sygnałów, korelacje wzajemne oraz wysunięte zostały wnioski na temat właściwości, różnic i cech w obydwu uszkodzeniach.

Abstract. This work presents the results of diagnostic studies carried out on the switched reluctance motor (SRM). Their main task was to apply rotor imbalance and its dynamic eccentricity on the test bench. The measured signals were acceleration (vibration), and phase current. There were analyzed spectra of these signals, their correlations and comparisons with conclusions have been made about the properties and the differences of both damages. The results of diagnostic studies carried out on the switched reluctance motor

Słowa kluczowe: SRM, silnik reluktancyjny, diagnostyka.

Keywords: SRM, switched reluctance motor, diagnostics

Wstęp

W ostatnich latach można zaobserwować znaczną degradację środowiska w wyniku takich czynników jak: globalne ocieplenie, efekt cieplarniany, wyczerpywanie się paliw kopalnych, wzrost ich cen oraz zwiększająca się ilość dwutlenku węgla w atmosferze[1]. Zjawiska te pośrednio zmotywowały przemysł do powrotu do napędu elektrycznego w wielu zastosowaniach szczególnie dla pojazdów elektrycznych i hybrydowych[2][3].

Znajdujący się tam napęd elektryczny musi spełniać szereg wymogów wytrzymałościowych. Jednym z silników mogących być tam stosowanych jest silnik reluktancyjny (SRM – Switched Reluctance Motor). Mimo słabszych właściwości energetycznych w porównaniu do popularniejszych silników elektrycznych, w szczególności do silnika z magnesami stałymi (BLDC), SRM ma pewne zalety, np. w postaci większej dostępności surowców na Ziemi (zwłaszcza poza Chinami) z których wytwarza się blachy elektrotechniczne dla niego (tj. różne stopy żelaza). Tańsza jest także produkcja SRMa oraz jego bezpieczeństwo montażu i użytkowania w porównaniu do wysokiej masy i siły przyciągania magnesu z ziem rzadkich[4][5]. Brak magnesów likwiduje także ryzyko rozmagnesowania materiału przez impulsy elektromagnetyczne bądź wysokie temperatury, dlatego zastosowanie SRMa może mieć duże powodzenie w wojsku bądź innej specjalizacji, gdzie niezawodność jest niezwykle ważna, czyli w takich lokalizacjach gdzie wymiana silnika, a więc długotrwałe wyłączenie napędu z funkcjonowania może spowodować znaczne szkody, więc i koszty. Dzięki swojej wyjątkowo trwałej konstrukcji (związanej m.in. z brakiem uzwojeń na wirniku oraz biegunami wydatnymi na stojanie i wirniku) silnik może osiągać prędkości obrotowe wynoszące ponad 10000 obr/min bez niebezpieczeństwa zniszczenia wirnika przez siłę odśrodkową.

Cel badań

Silnik reluktancyjny, podobnie jak pozostałe rodzaje silników elektrycznych, jest podatny na różne typy uszkodzeń w okresie jego eksploatacji. Uszkodzenia te można podzielić ogólnie na elektryczne i mechaniczne. Niniejsza praca zajmując się tylko uszkodzeniami mechanicznymi.

Najczęstsze uszkodzenia mechaniczne mogące wystąpić w silnikach elektrycznych to: ekscentryczność (niewspółosiowość) statyczna i dynamiczna, niewyważenie, uszkodzenia łożysk, luzy mechaniczne lub ugięcie wału [6][7].

Celem badań był eksperyment polegający na przeprowadzeniu dwóch z wyżej wymienionych usterek mechanicznych w silniku reluktancyjnym, tj. ekscentryczności dynamicznej i niewyważenia. Do tego celu zostało zaprojektowane i zbudowane stanowisko pomiarowe, które umożliwia wywołanie tych uszkodzeń, za pomocą specjalnych elementów mechanicznych.

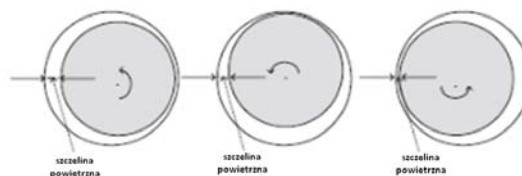
Następnie zbadane i porównane zostały sygnały z silnika bez wprowadzonego uszkodzenia i z uszkodzeniem. Wielkościami mierzonymi były prąd fazowy oraz drgania (przyspieszenie).

Mechaniczne uszkodzenia silnika reluktancyjnego

Każdy rodzaj usterki mechanicznej powoduje negatywne skutki w pracy silnika elektrycznego, a zatem całego napędu, takie jak większe wibracje, a zatem hałas, większe pulsacje momentu obrotowego, straty energetyczne i inne[8][9].

Ekscentryczność (niewspółosiowość)

Ekscentryczność jest bardzo częstym uszkodzeniem w silnikach elektrycznych i w mniejszym bądź większym zakresie występuje ona w każdym silniku. Charakteryzuje się niejednorodną nierównomiernością szczeliny powietrznej między wirnikiem a stojaniem. To zjawisko może być zaobserwowane w widmie prądu jako harmoniczna spowodowana zmieniającą się indukcyjnością powodującą nierównomierny strumień w szczelinie powietrznej. W najgorszym przypadku ekscentryczność może doprowadzić do obcierania wirnika ze stojaniem, a zatem do ich zniszczenia.



Rys.1. Zjawisko ekscentryczności dynamicznej

Istnieją dwa rodzaje ekscentryczności: statyczna i dynamiczna (rys.1). Ekscentryczność statyczna występuje wtedy, gdy oś obrotu wirnika tożsama z jego osią geometryczną nie pokrywa się z osią geometryczną stojana. Ekscentryczność dynamiczna występuje wtedy, gdy oś obrotu wirnika tożsama z osią geometryczną stojana nie pokrywa się z osią geometryczną wirnika[10]. Ze

względu na nierównomierność szczeliny powietrznej, strumień magnetyczny zmienia się powodując nieregularne wartości prądowe widoczne w widmie. W rzeczywistych warunkach ekscentryczności statyczne i dynamiczne występują jednocześnie. Może istnieć wiele ich przyczyn jak np. wady w konstrukcji wirnika (np. niewyważenie, deformacja okrągłej geometrii), brakujące lub zniszczone elementy konstrukcyjne (np. śruby), nieprawidłowy montaż lub uszkodzone łożyska[11][12].

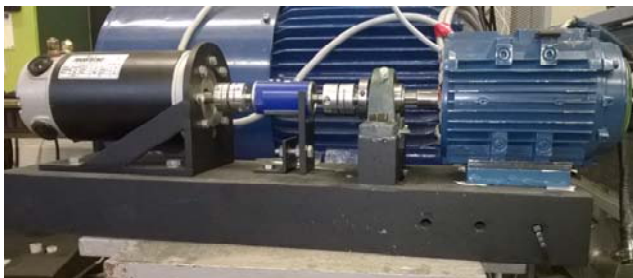
Niewyważenie

Niewyważenie jest także częstym uszkodzeniem w silnikach elektrycznych. W bezpośredni bądź pośredni sposób powoduje ono około połowy uszkodzeń, które w nich występują. Niewyważenie można zdefiniować jako niesymetryczne rozłożenie masy wokół osi obrotu[10]. Można je podzielić na statyczne, dynamiczne i sprzężone. W warunkach rzeczywistych występuje sprzężone z przewagą statycznego lub dynamicznego.

Przyczynami powstawania tego typu uszkodzenia są, podobnie jak w przypadku ekscentryczności, wady konstrukcyjne. Niewyważenie powoduje także szybsze zużycie się łożysk dzięki większym obciążeniom

Stanowisko badawcze

Stanowisko pomiarowe zawiera specjalne elementy, które powodują uszkodzenia mechaniczne: niewyważenie i ekscentryczność dynamiczną (rys.2).



Rys.2. Stanowisko badawcze z zamontowanym silnikiem reluktancyjnym

Dla zadania ekscentryczności wykonano tuleję wywołującą przesunięcie między osią wirnika a osią stojana równą 0,25 mm (rys. 3), natomiast niewyważenie jest zadane poprzez wkręcenie śruby w otwór w tarczy, która jest zamocowana bezpośrednio na wale silnika (rys. 4).

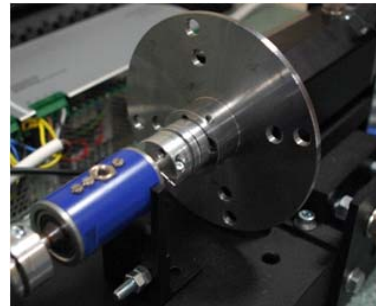


Rys.3. Tuleja z podporą łożyskową do wywołania ekscentryczności

Stanowisko umożliwia przebadanie silnika w całym zakresie jego pracy, dlatego konieczne było obciążenie o swobodnie regulowanym momencie obciążającym badany silnik.

Testowanym silnikiem do badań był silnik reluktancyjny o mocy nominalnej 550W, wyprodukowany przez Huayang electric specjalnie na potrzeby tych badań. Pomiędzy badanym silnikiem a obciążeniem znajdował się

momentomierz połączony za pomocą dwóch sprzęgieł. Na potrzeby stanowiska zostały zaprojektowane i wykonane układy elektroniczne pozwalające na ręczne sterowanie pracą silnika badanego i obciążanego. Odpowiednie układy zapewniały także kondycjonowanie sygnałów pomiarowych i dopasowanie ich do poziomów akceptowalnych dla kart pomiarowych firmy National Instruments.



Rys.4. Tarcza do wprowadzania niewyważenia

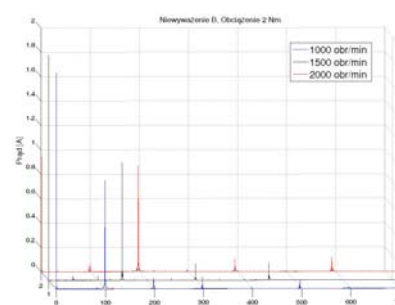
Układ do sterowania silnikiem DC został zrealizowany jako źródło prądowe o regulowanej wydajności. Oba układy umożliwiały ręczne sterowanie stanowiskiem oraz automatyczne za pomocą odpowiednich sygnałów analogowych, co umożliwiło pewne zautomatyzowanie pomiarów. Na potrzeby rejestracji i wstępnej analizy danych stworzone zostało oprogramowanie w środowisku LabView.

Wyniki

Przeprowadzonymi uszkodzeniami na stanowisku pomiarowym były ekscentryczność dynamiczna i niewyważenie wirnika. Wszystkie pomiary są pokazane w funkcji częstotliwości. Wyniki eksperymentów porównane są w wielkościach prądu, przyspieszenia oraz korelacji wzajemnej między nimi.

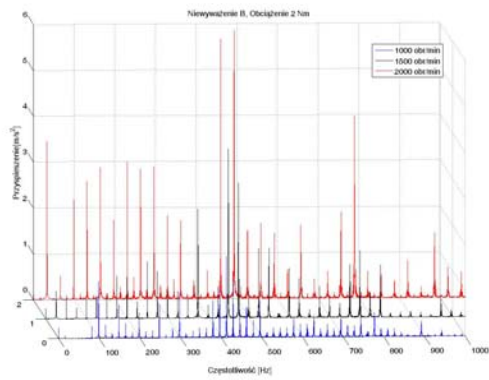
Niewyważenie

Pierwszym z badanych uszkodzeń było niewyważenie. W eksperymencie zmieniano prędkość obrotową, obciążenie i stopień niewyważenia (śruba była wkręcana w otwór bliższy [wariant A], bądź dalszy od osi obrotu [wariant B]).

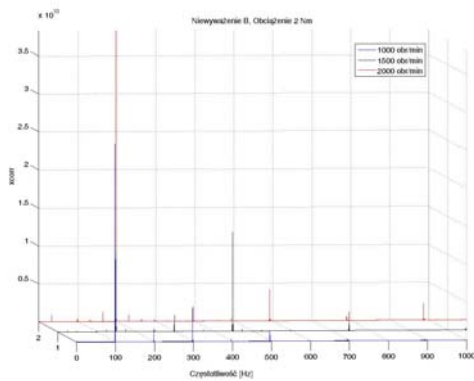


Rys.5. Zmiana prędkości dla stałego obciążenia (2 Nm) i niewyważenia w funkcji prądu

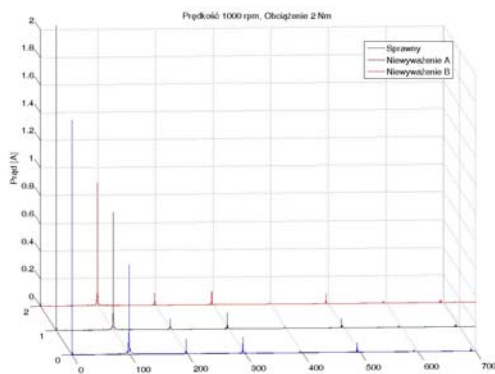
Na rysunkach 5, 6 i 7 pokazano zmianę prędkości obrotowej dla stałych wartości obciążenia i niewyważenia. Można zauważyć charakterystyczne przesunięcie podstawowej harmonicznej wraz ze zmianą prędkości obrotowej, natomiast wykres prądowy (rys. 5) nie wykazuje poza tym innych zmian w sygnale.



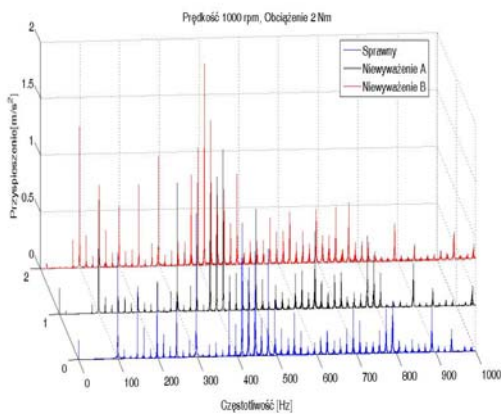
Rys.6. Zmiana prędkości dla stałego obciążenia (2 Nm) i niewyważenia w funkcji przyspieszenia



Rys.7. Zmiana prędkości dla stałego obciążenia (2 Nm) i niewyważenia w funkcji korelacji

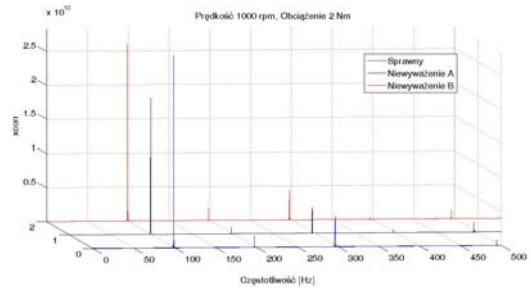


Rys.8. Zmiana niewyważenia dla stałego obciążenia (2 Nm) i prędkości (1000 rpm) w funkcji prądu

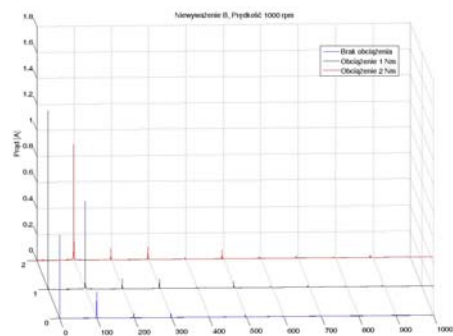


Rys.9. Zmiana niewyważenia dla stałego obciążenia (2 Nm) i prędkości (1000 rpm) w funkcji przyspieszenia

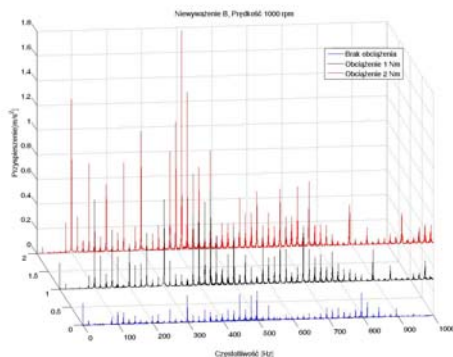
Zmiana rodzaju niewyważenia nie pokazuje niemal żadnych różnic we wszystkich sygnałach na trzech powyższych rysunkach (rys. 8, 9 i 10). Umieszczenie śruby symulującej rodzaj niewyważenia, a nawet kwestia jej obecności niemal w żadnym stopniu nie wpływa na otrzymane wyniki.



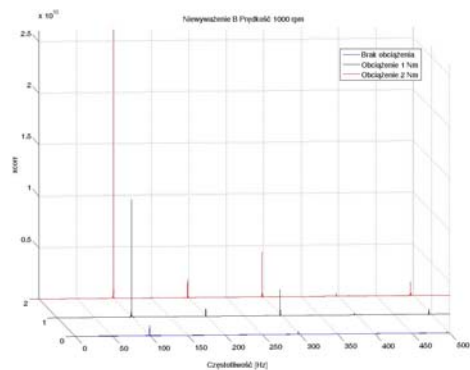
Rys.10. Zmiana niewyważenia dla stałego obciążenia (2 Nm) i prędkości (1000 rpm) w funkcji korelacji



Rys.11. Zmiana obciążenia dla stałego niewyważenia i stałej prędkości obrotowej (1000 rpm) w funkcji prądu



Rys.12. Zmiana obciążenia dla stałego niewyważenia i prędkości obrotowej 1000 rpm w funkcji przyspieszenia



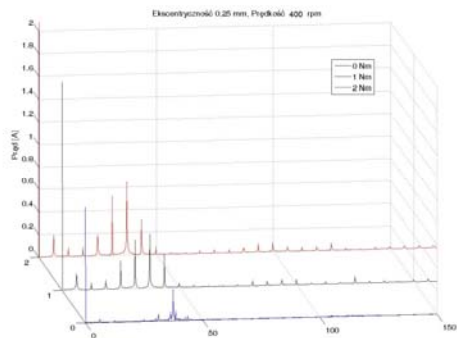
Rys.13. Zmiana obciążenia dla stałego niewyważenia i prędkości obrotowej 1000 rpm w funkcji korelacji

Zmiana, tj. wzrost obciążenia skutkuje jedynie niewielkim wzrostem amplitudy we wszystkich trzech pokazanych wielkościach (rys. 11, 12 i 13).

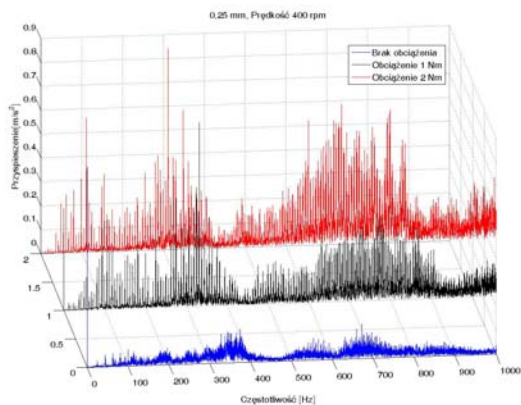
Symulacja niewyważenia wirnika pokazała bardzo małe różnice między zmiennymi wielkościami obciążenia i stopnia niewyważenia. Prawdopodobnie związane jest to ze sztywnością zamocowanej tarczy i brakiem znaczącego wpływu przykręconej śruby na drgania całego układu.

Ekscentryczność dynamiczna

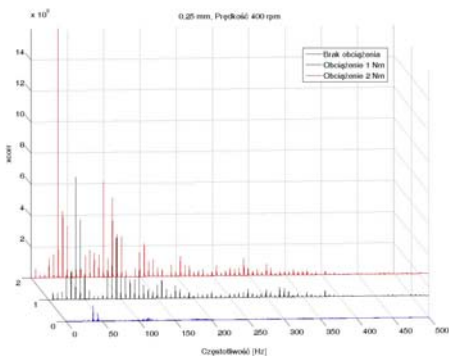
Drugim zasymulowanym uszkodzeniem była ekscentryczność dynamiczna. Możliwa była do zadania jej wartość równa 0,25 mm. Podobnie jak w poprzednim eksperymencie tutaj też zmieniano obciążenia i prędkość obrotową zestawiając je z ekscentrycznością.



Rys.14. Zmiana obciążenia dla ekscentryczności 0,25 mm i prędkości 400 rpm w funkcji prądu



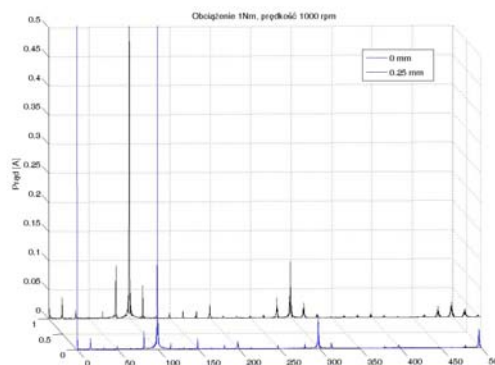
Rys.15. Zmiana obciążenia dla ekscentryczności 0,25 mm i prędkości 400 rpm w funkcji przyspieszenia



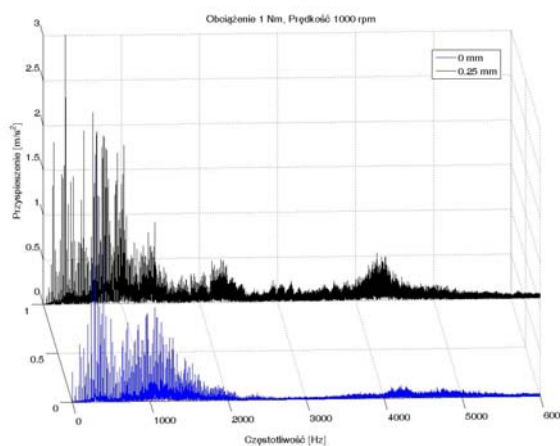
Rys.16. Zmiana obciążenia dla ekscentryczności 0,25 mm i prędkości 400 rpm w funkcji korelacji

Zmiana obciążenia przy wprowadzonej mimośrodowości i niewielkiej prędkości 400 rpm (rys. 14, 15 i 16) pokazała ciekawe zjawisko modulacji pomiędzy pierwszą a szóstą

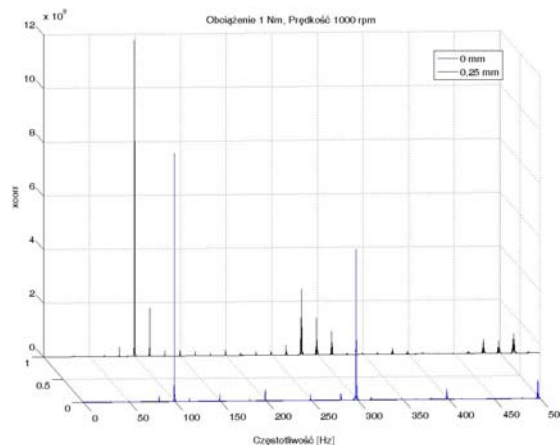
harmoniczną, widoczne szczególnie na widmie prądu (rys. 14). Widać tu także wzrost wartości podstawowych harmonicznych podobnie jak w przypadku niewyważenia.



Rys.17. Zmiana ekscentryczności dla obciążenia 1 Nm i prędkości 1000 rpm w funkcji prądu



Rys.18. Zmiana ekscentryczności dla obciążenia 1 Nm i prędkości 1000 rpm w funkcji przyspieszenia



Rys.19. Zmiana ekscentryczności dla obciążenia 1 Nm i prędkości 1000 rpm w funkcji korelacji

W ostatnim zaprezentowanym badaniu (rys. 17, 18 i 19) porównano wykresy z i bez wprowadzonej ekscentryczności przy stałym obciążeniu (1 Nm) i prędkości równej 400 rpm. Najwyższą wartość widma prądowego można zaobserwować wyraźnie dla częstotliwości równej 100 Hz, co odpowiada szóstej harmonicznej. Bierze się ona z geometrii wirnika SRMa, gdyż posiada on 6 biegunów wydanych, także $16,67 \times 6 = 100$ Hz. Widać także, że powiela

się ona jako svoja trzecia (300Hz) i piąta (500Hz) harmoniczna, a wokół nich widać modulację innych prążków, które przyjmują wyższe wartości wraz z zadaną mimośrodowością.

Podsumowanie

Pomiary diagnostyczne silnika reluktancyjnego polegały na zadaniu dwu różnych uszkodzeń: niewyważenia wirnika oraz ekscentryczności dynamicznej, które przy eksploatacji maszyn w rzeczywistych warunkach występują razem.

Pierwszy pomiar, tj. niewyważenie nie pokazał znaczących różnic między poszczególnymi wynikami, poza jedynie niewielkim wzrostem wielkości badanych wraz ze wzrostem obciążenia. Samo zadanie niewyważenia i zmiana jego charakterystyki nie wpłynęło na otrzymane wyniki. Prawdopodobnie wynika to ze sztywności układu pomiarowego.

Drugi pomiar, tj. ekscentryczność dynamiczna pokazał znaczące zmiany w wynikach eksperymentu w kwestii wzrostu obciążenia czy samego zadania mimośrodowości. Wraz ze wzrostem tych parametrów widać wzrost prążków widma, szczególnie przy szóstej harmonicznej i jej wielokrotnościach oraz między pierwszą a szóstą.

Dalszym etapem badań będzie znalezienie przyczyn powstawania tych zależności oraz zbudowanie modelu polegającego na zasymulowaniu tych uszkodzeń obliczeniowo. Takie badania mogą przyczynić się do kompleksowego programu diagnostyki SRMa oraz znalezienia jego słabych i mocnych punktów jako układu napędowego.

Autorzy: mgr inż. Jakub Lorencki, Politechnika Warszawska, Instytut Pojazdów, ul. Narbutta 84, 02-524 Poznań, E-mail: j.lorencki@mechatronika.net.pl; prof. dr hab. inż. Stanisław Radkowski, Politechnika Warszawska, Instytut Pojazdów, ul. Narbutta 84, 02-524 Poznań, E-mail: ras@simr.pw.edu.pl;

LITERATURA

- [1] Höök M., Tang X. Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change: a review, *Energy Policy*, 52 (2013)
- [2] Sperling D., Deborah G. Two billion cars: driving toward sustainability, *Oxford University Press* 2009
- [3] Lorencki J., Tokarzewski J. Osiągi pojazdów o napędzie niekonwencjonalnym *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów*, 5 (2010) nr 81
- [4] Rarity of rare earths prompts a renaissance in motor design <http://www.dpaonthenet.net/article/57042/Rarity-of-rare-earths-prompts-a-renaissance-in-motor-design.aspx>, (20-09-2016)
- [5] How Beijing Cornered the Rare Earths Market <http://www.foreignaffairs.com/articles/137602/damien-ma/china-digs-it>, (20-09-2016)
- [6] Toliyat H. Electric Machines: Modeling, Condition Monitoring, and Fault Diagnosis 2012 *CRC Press*
- [7] Vibration Diagnostic Guide - *SKF Reliability Systems* 2000, www.skfreliaability.com (20-09-2016)
- [8] Lorencki J., Radkowski S. Procedury i Analiza usterek w silnikach synchronicznych z magnesami trwałymi, *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów* 2 (2014) nr 98
- [9] Lorencki J., Radkowski S. Elektryczna diagnostyka asymetrii wirnika w pojazdach hybrydowych 4 (2013) nr 95
- [10] Biernat A.: Analiza sygnałów diagnostycznych maszyn elektrycznych *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, 2015
- [11] Szulim P., Gontarz S., Radkowski S., Analysis of the magnetic field in the space focused on diagnostic inference. Proceedings of the *10th European Conference on Magnetic Sensors and Actuators*, Wien, 06-09.07.2014
- [12] Radkowski S., Szulim P., The use of diagnostic information to the energy-optimal path planning of autonomous vehicle. *Logistic and Transportation*, Vol 21