

O C E N A
rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Barańskiego pt.
„Diagnostyka drgań w maszynach elektrycznych z magnesami
trwałymi wykorzystująca sygnały własne

Recenzję opracowałem na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej prof. dr hab. inż. Pawła Sowy, pismo nr RE 275/BD17/18 z dnia 11.05. 2018 r.

Uwagi wstępne

Maszyny elektryczne wirujące, w których zastosowano magnesy trwałe, mają w większości prostą budowę. Najczęściej spotykane są rozwiązania konstrukcyjne, w których część zewnętrzna - stojan, jest nieruchoma, natomiast część wewnętrzna - wirnik obraca się. Rozwiązanie odwrotne, czyli część zewnętrzna obraca się, a wał z twornikiem jest nieruchomy. stosowane jest np. w silnikach w kołach pojazdów. Maszyny z magnesami trwałymi nie mają uzwojenia w wirniku i charakteryzują się najlepszymi właściwościami elektromechanicznymi wśród wszystkich typów przetworników energii mechanicznej na elektryczną i odwrotnie, nie mają pierścieni ślizgowych i szczotek.

Drgania i hałas w maszynach elektrycznych wirujących ze względu na źródła pochodzenia można podzielić następująco:

- elektromagnetyczne,
- mechaniczne,
- aerodynamiczne,
- elektroniczne.

Źródła pochodzenia elektromagnetycznego wynikają z sił magnetycznych działających na stojan i wirnik maszyny. Jednym z głównych źródeł drgań i hałasu pochodzenia mechanicznego jest stojan, który ma swoje częstotliwości własne. Kiedy jedna z częstotliwości wzbudzających siły magnetyczne lub mechaniczne jest bliska częstotliwości własnej stojana skutkuje to zjawiskiem rezonansu. Źródłami drgań pochodzenia mechanicznego są głównie niewyważenie wirnika i wentylatora oraz łożyska. Aerodynamiczne źródła są spowodowane ruchem czynnika chłodzącego maszyny. Elektroniczne źródła wynikają z tego, że napięcie i prąd zasilający odbiega od idealnego przebiegu i zawiera harmoniczne, które są źródłem powstawania dodatkowych harmonicznych w widmie sił magnetycznych.

Badania procesów drganiowych w maszynach elektrycznych wirujących prowadzi się w kilku kierunkach. Pierwszym kierunkiem są badania analityczne, numeryczne i eksperymentalne pod kątem minimalizacji drgań ze względu na niekorzystny ich wpływ na pracę maszyn i zdrowie człowieka. Najogólniej mówiąc można stwierdzić, że istnieją dwa sposoby ograniczenia drgań pochodzenia elektromagnetycznego. Pierwszy sposób bazuje na wykorzystaniu modyfikacji parametrów zasilania poprzez odpowiednie kształtowanie przebiegu napięcia lub prądu zasilającego. Kolejny sposób polega na modyfikacji parametrów geometrycznych obwodu magnetycznego silnika. Wybór rozwiązań konstrukcyjnych jest określony m.in. przez sprawność silnika i koszty technologiczne.

Drugim kierunkiem badań jest analiza eksperymentalna drgań pracującej maszyny, która jest bardzo istotnym źródłem informacji. W zależności od obserwowanego spektrum drgań uzyskujemy informacje o pewnych stanach awaryjnych maszyny lub o powstałych w procesie produkcji wadach. Poziom drgań i hałasu maszyn jest związany z ich stanem technicznym, im większe zużycie, tym większe natężenie tych niekorzystnych zjawisk, ta zależność jest wykorzystywana w systemach diagnostyki i może służyć do oceny stanu maszyny i zapobieganiu awariom.

Na skutek wzrastającej presji ekonomicznej ze strony producentów na zużycie coraz to mniejszej ilości materiałów, nowoczesne trendy projektowe w maszynach elektrycznych wirujących prowadzą do występowania większych wartości: indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej oraz gęstości prądu. Skutkuje to między innymi zwiększeniem wartości sił magnetycznych i konstruowaniem mniejszych maszyn o dużej intensywności sygnału wibroakustycznego. Z drugiej strony wzrastające w ostatnich latach wymagania norm europejskich są inspiracją dla producentów maszyn elektrycznych którzy starają się, aby poziom drgań i hałasów maszyn był jak najmniejszy. Poziom drgań i emitowanego hałasu jest jednym z czynników decydujących o sukcesie marketingowym na rynku maszyn elektrycznych.

Użycie przemienników częstotliwości (PWM) do zasilania maszyn powoduje, że spektrum wzbudzających sił magnetycznych jest duże i wzrasta możliwość wystąpienia zjawiska rezonansu wskutek koincydencji częstotliwości własnych i sił wymuszających. Może to doprowadzić nawet do uszkodzenia maszyny. Zagadnienia ograniczania poziomu drgań i hałasu maszyn nabierają coraz większego znaczenia.

Drgania, a w konsekwencji hałas w maszynach elektrycznych może być ograniczony jeśli obszar częstotliwości występujących sił magnetycznych nie prowadzi do pobudzenia częstotliwości własnych stojana i wirnika. To może być osiągnięte już na etapie wstępnym projektowania maszyn. Należy unikać koincydencji częstotliwości wymuszających sił magnetycznych oraz częstotliwości własnych maszyn. Dlatego poprawne wyznaczenie częstotliwości własnych maszyn jest bardzo ważnym zagadnieniem z punktu widzenia ograniczenia drgań i hałasu w maszynach elektrycznych.

Rezultaty analitycznych i numerycznych modeli odzwierciedlających wibroakustyczne własności maszyn elektrycznych oraz badania eksperymentalne są pomocne do zrozumienia mechanizmów generowania drgań i hałasu. Przy udziale tych modeli tworzone są strategie do ograniczenia emisji drgań i hałasu już na etapie projektowania maszyn. Wyznaczenie drgań maszyny na etapie jej projektowania narzuca konieczność określenia wpływu każdego parametru geometrycznego i materiałowego maszyny na poziom wytwarzanego hałasu i drgań.

W projektowaniu maszyn przez długi okres czasu do wyznaczania poziomu drgań i hałasu używano metod analitycznych, które pozwalały na określenie wpływu: harmonicznych występujących w prądzie zasilającym, nasycenia, charakterystyki magnesowania, ekscentryczności wirnika na kształt siły elektromagnetycznej. Jednak mimo, że spektrum częstotliwości drgań mogło być poprawnie wyznaczone, to określenie wielkości amplitud dokonywane było najczęściej z dużym błędem z powodu braku możliwości modelowania szczegółów konstrukcyjnych silnika, takich jak kształt zębów czy żłobka. Skutkowało to brakiem możliwości dokładnego odwzorowania przebiegu siły Maxwella w szczelinie powietrznej. W stosunku do metod analitycznych Metoda Elementów Skończonych (MES) pozwala uwzględnić więcej szczegółów budowy mechanicznej silnika.

Numeryczne modelowanie drgań zakłada zwykle budowę dwóch modeli, magnetycznego w wyniku, którego otrzymujemy rozkład sił magnetycznych i mechanicznego w wyniku którego otrzymujemy odpowiedź układu na wymuszenie siłowe. Trzecim etapem może być

tworzenie modelu akustycznego dzięki, któremu znamy odpowiedź akustyczną układu podlegającemu działaniu sił magnetycznych.

Do weryfikacji poprawności modelu magnetycznego silnika służą pomiary momentu elektromagnetycznego i zaczepowego. Dla weryfikacji modelu mechanicznego prowadzi się pomiary częstotliwości własnych oraz pomiar drgań całkowitych zewnętrznego punktu obudowy stojana. Wyniki pomiarów dają odpowiedź na pytanie, czy zbudowany model mechaniczny w sposób poprawny odzwierciedla model fizyczny. Dokładność otrzymanych rezultatów zależy zarówno od wielkości błędów numerycznych z jakimi zostały wyznaczone siły magnetyczne oraz od tego jak model magnetyczny i mechaniczny silnika różnią się od rzeczywistego obiektu. Wielkość tego błędu zależy od właściwego modelowania: materiałów z jakich zbudowany jest silnik oraz uwzględnienia geometrii badanej maszyny.

Aplikacje napędów silników bezszczotkowych o magnesach trwałych wykorzystywanych w gospodarstwach domowych są jednym z najbardziej dynamicznie rozwijających się rynków dla maszyn elektrycznych. Obecnie światowi producenci maszyn elektrycznych preferują użycie tych maszyn do pralek, lodówek, klimatyzatorów czy wentylatorów z powodu ich większej niezawodności, sprawności oraz korzystniejszego stosunku wytwarzanego momentu elektromagnetycznego do masy w porównaniu do innych rodzajów napędów pracujących przy zmiennej prędkości obrotowej. Silniki tego rodzaju znajdują również szerokie zastosowanie w napędach magnetofonów, magnetowidów, wideokamer, napędów CD/DVD, przemyśle komputerowym jako napędy dysków twardych, wentylatorów chłodzących oraz drukarek.

Możliwość osiągnięcia długiego okresu niezawodnej pracy oraz dużych prędkości obrotowych decyduje o popularności stosowania w przemyśle medycznym silników bezszczotkowych o magnesach trwałych do napędów: analizatorów medycznych, wirówek, respiratorów, przyrządów chirurgicznych i dentystycznych.

W przemyśle samochodowym silniki tego rodzaju są stosowane do pomp paliwa, układów kontroli i sterowania pojazdem. Stosowane są również jako napędy pojazdów elektrycznych takich jak lekkie pojazdy dostawcze, wózki inwalidzkie oraz motorowery. Znajdują również zastosowanie do napędu łodzi motorowych, statków oraz robotów podwodnych. W tych zastosowaniach decydujące znaczenie ma dłuższy niezawodny czas pracy, mniejsza emisja hałasu oraz mała masa i wymiary silnika.

W przemyśle lotniczym zastosowania obejmują napędy: pomp, układów kontroli żyroskopowej, popularne szczególnie ze względu na trudne warunki środowiskowe, w których zużycie szczotek w silnikach komutatorowych byłoby znacznie szybsze.

Większość zastosowań w automatyce obejmuje serwonapędy w robotach przemysłowych, gdzie szczególnie ważna jest dynamika w zakresie zmian momentu i prędkości.

Rozwój możliwości obliczeniowych komputerów oraz metod numerycznych skutkuje powstawaniem konstrukcji maszyn, które są zoptymalizowane ze względu na różne kryteria, którymi mogą być na przykład: maksymalna wartość momentu elektromagnetycznego, minimalny poziom generowanych strat czy emitowanego poziomu drgań i hałasów. Identyfikacja źródeł drgań i hałasów, próby ich ograniczania w maszynach elektrycznych jak również wykorzystanie do celów diagnostycznych stały się celem szczegółowych badań od lat czterdziestych XX wieku. Wraz z rozwojem nowych rodzajów maszyn, które znajdowały zastosowanie w aplikacjach dla zmiennych prędkości obrotowych zainteresowanie sygnałem wibroakustycznym nabrało większego znaczenia.

Tematyka rozprawy

Tematyka rozprawy jest aktualna. Maszyny elektryczne z magnesami trwałymi są aktualnie przedmiotem badań prawie we wszystkich ośrodkach naukowych zajmujących się maszynami i napędami elektrycznymi. Maszyny wzbudzone magnesami trwałymi zdobywają

coraz to większą popularność, przede wszystkim dzięki wysokiej sprawności w całym zakresie prędkości obrotowej, dużej przeciążalności momentem, szerokiemu zakresowi prędkości obrotowej i jej efektywnej regulacji oraz dużej niezawodności ruchowej w porównaniu z silnikami prądu stałego. Silniki elektryczne z magnesami trwałymi są najbardziej ekonomicznymi napędami elektrycznymi. Problematyka drgań tych silników jest problematyką nową. Doktorant, podejmuje istotny problem badawczy, gdyż wymienione maszyny są już stosowane bądź przewidywane do zastosowania w urządzeniach w których wymagany jest możliwie najniższy poziom drgań. Na przykład w maszynach wysokoobrotowych.

Ocena merytoryczna

Podstawowym celem i zadaniem badań przedstawionych w pracy było *opracowanie metody diagnostyki drganiowej napędów z maszynami wzbudzanymi magnesami trwałymi*. Założeniem podstawowym opracowanej metody było *wykorzystanie sygnałów własnych maszyny (natężenie prądu, napięcie) jako sygnał diagnostyczny oraz wyeliminowanie czujnika drgań i aparatury drganiowej w aplikacjach przemysłowych i laboratoryjnych*.

Bezpośrednim celem badań było *uzyskanie odpowiedzi na pytanie czy istnieje możliwość wykorzystania maszyny z magnesami trwałymi także jako czujnik drgań do analizy problemów, z którymi można się spotkać w normalnej eksploatacji napędów elektrycznych:*

- *asymetria obciążenia generatora PM,*
- *asymetria zasilania silnika PM,*
- *asymetria szczeliny powietrznej w pracy generatorowej oraz silnikowej maszyny PM,*
- *niewyważenie generatora oraz silnika PM.*

Zdefiniowano tezę, że możliwe jest wykazanie *poprzez badania laboratoryjne i potwierdzenie symulacjami komputerowymi, że „badania diagnostyczne drgań napędów z maszynami elektrycznymi ze wzbudzeniem od magnesów trwałych metodą sygnałów własnych, wykorzystują ich specyficzne właściwości pozwalające użyć maszynę jako czujnik drgań”.*

Zakres pracy obejmuje:

1. *Rozpoznanie literaturowe zagadnienia.*
2. *Przedstawienie modelu matematycznego, modelu symulacyjnego oraz symulacje komputerowe:*
 - *symulacje komputerowe w reżimie pracy generatorowej – analiza asymetrii obciążenia oraz analiza asymetrii rozkładu szczeliny powietrznej,*
 - *symulacje komputerowe w reżimie pracy silnikowej – analiza asymetrii zasilania oraz analiza asymetrii rozkładu szczeliny powietrznej.*
3. *Badania laboratoryjne sygnałów własnych maszyn wzbudzanych magnesami trwałymi:*
 - *badania maszyny nienapędzanej oraz niezasilanej,*
 - *badania laboratoryjne w reżimie pracy generatorowej – analiza asymetrii obciążenia, analiza asymetrii rozkładu szczeliny powietrznej oraz analiza niewyważenia,*
 - *badania laboratoryjne w reżimie pracy silnikowej – analiza asymetrii zasilania, analiza asymetrii rozkładu szczeliny powietrznej oraz analiza niewyważenia.*
4. *Opracowanie równań analitycznych będących markerami poszczególnych anomalii w pracy maszyn elektrycznych ze wzbudzeniem pochodzącym od magnesów trwałych.*

Praca doktorska obejmuje dziewięć rozdziałów oraz dodatki w których podano spis treści, spis oznaczeń, spis rysunków, spis tabel i literaturę. Całość liczy 135 stron. W rozdziale pierwszym, wprowadzającym, oprócz celu, tezy i zakresu pracy, przedstawiono źródła drgań w maszynach elektrycznych i genezę faktu wykorzystania maszyn elektrycznych jako czujnika drgań, przedstawiono aktualny stan techniki. Rozdział drugi obejmuje omówienie metodologii, przedstawiono przedmiot badań. Przedmiotem badań były maszyny elektryczne z magnesami trwałymi o wielkości mechanicznej 132, które zostały wykonane w oparciu o różne kompilacje czterech stojanów oraz sześciu wirników (wykonano dwa stojany o liczbie żłobków $Q_s = 36$, jeden ze skosem, drugi bez skosu, o liczbie biegunów $2p = 4$ i 12, wykonano również stojan o liczbie żłobków $Q_s = 48$, ze skosem, o liczbie biegunów $2p = 4$, wykonano również stojan o liczbie żłobków $Q_s = 48$, ze skosem odpowiadającym magnetycznie skosowi w stojanie o jedną podziałkę żłobkową stojana, o liczbie biegunów $2p = 4$, wykonano również stojan o liczbie żłobków $Q_s = 60$, ze skosem odpowiadającym magnetycznie skosowi w stojanie o jedną podziałkę żłobkową stojana o liczbie biegunów $2p = 4$, wykonano również wirnik SPM (z magnesami umieszczonymi na powierzchni), bez skosu, o liczbie biegunów $2p = 4$, wykonano również wirnik SPM (z magnesami umieszczonymi na powierzchni), ze skosem skokowym odpowiadającym magnetycznie skosowi w stojanie o jedną podziałkę żłobkową stojana, o liczbie biegunów $2p = 4$, wykonano również wirnik SPM (z magnesami na powierzchni), bez skosu, o liczbie biegunów $2p = 12$, wykonano również dwa wirniki IPM (z magnesami umieszczonymi wewnątrz), jeden ze skosem odpowiadającym magnetycznie skosowi w stojanie o jedną podziałkę żłobkową stojana, drugi bez skosu, o liczbie biegunów $2p = 4$, wykonano również wirnik IPMV (z magnesami umieszczonymi wewnątrz w kształcie litery V), bez skosu, o liczbie biegunów $2p = 4$). W rezultacie końcowym przebadano 16 generatorów i 16 silników z magnesami trwałymi. W rozdziale trzecim przedstawiono model matematyczny i symulacje komputerowe. W rozdziale czwartym przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych na stole wibracyjnym, przy wymuszeniu impulsowym, jednostajnym i przy napędzaniu maszyny. Do badań na stole wibracyjnym wykorzystano generator z magnesami trwałymi typu: PMzsg132M-12 ze stojanem $Q_s = 36$ bez skosu i wirnikiem SPM posiadającym magnesy umieszczone na powierzchni. Rozdział piąty to pierwszy przykład zastosowania praktycznego opracowanej przez Doktoranta metody. Jest to analiza wpływu niesymetrycznego obciążenia na pracę generatora synchronicznego ze wzbudzeniem pochodzącym od magnesów trwałych. Wykorzystano wyniki badań oraz symulacji komputerowych maszyny typu: PMwsg132M - 4 ze stojanem $Q_s = 36$ bez skosu i wirnikiem IPMV posiadającym magnesy umieszczone wewnątrz w kształcie litery V. Symulacje komputerowe oraz badania laboratoryjne przeprowadzono dla parametrów znamionowych. Badania wykonano dla asymetrii: $I_U = 0.4$ A, $I_V = 66.4$ A, $I_W = 66.3$ A. Wszystkie przebiegi czasowe przedstawiono dla jednego pełnego obrotu badanej maszyny. Rozdział szósty obejmuje analizę wpływu niesymetrycznego zasilania na pracę silnika synchronicznego ze wzbudzeniem pochodzącym od magnesów trwałych. Analizę prowadzono dla maszyny typu: SMzsg132M-4 ze stojanem o liczbie żłobków: $Q_s = 36$, bez skosu i wirnikiem ze skosem skokowym odpowiadającym magnetycznie skosowi w stojanie o jedną podziałkę żłobkową stojana posiadającym magnesy umieszczone na powierzchni (SPM). Badania przeprowadzono dla asymetrii zasilania: $U_U = 39.1$ V, $U_V = 36.2$ V, $U_W = 36.8$ V. W rozdziale przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych. Rozdział siódmy poświęcono asymetrii szczeliny powietrznej. Analizę wpływu asymetrycznego rozkładu szczeliny powietrznej na pracę generatora synchronicznego ze wzbudzeniem pochodzącym od magnesów trwałych przedstawiono wykorzystując wyniki badań oraz symulacji komputerowych maszyny typu: PMzsg132M-4 ze stojanem 48 żłobkowym i wirnikiem SPM posiadającym magnesy umieszczone na powierzchni. Maszyna została zaprojektowana ze szczeliną powietrzną $\delta = 1.5$ mm – celem ułatwienia modelowania asymetrii rozkładu pola. Aby uzyskać asymetrię

szczeliny powietrznej zastosowano specjalne tarcze łożyskowe, które umożliwiają uzyskiwanie przesunięć między stojanem, a wirnikiem w osiach x, y oraz z. Tarcze umożliwiają zmiany geometrii w kierunkach x, y o ± 2 mm, natomiast w kierunku z o ± 10 mm od stanu symetrii. Symulacje komputerowe oraz badania laboratoryjne przeprowadzono dla parametrów znamionowych. Natomiast podczas badań przy pracy z asymetrycznym rozkładem pola, nie przekraczano prądu znamionowego. Symulacje oraz badania wykonano dla asymetrii $\delta_{\min} = 0.5$ mm, $\delta_{\max} = 2.5$ mm. W rozdziale ósmym przedstawiono zagadnienie niewyważenia w generatorze i silniku z magnesami trwałymi. Są to wyniki symulacji komputerowych oraz wyniki badań laboratoryjnych. Do badań laboratoryjnych wykorzystano maszynę z magnesami trwałymi typu generator: PMzsg132M-4 ze stojanem $Q_s = 36$ i wirnikiem SPM posiadającym magnesy umieszczone na powierzchni oraz silnik typu: SMzsg132M-4 ze stojanem $Q_s = 36$ i wirnikiem SPM posiadającym magnesy umieszczone na powierzchni. . Rozdział dziewiąty zawiera wnioski i uwagi końcowe.

Uwagi ogólne

Większość badań mających na celu detekcję drgań w maszynie elektrycznej opiera się prawie zawsze na wykorzystaniu zewnętrznych czujników drgań, najczęściej akcelerometrów ze wzmacniaczami ładunku, czujników profesjonalnie mocowanych do badanej maszyny wraz ze specjalistyczną aparaturą do pomiarów i analizy drgań w dziedzinie czasu i częstotliwości. Dlatego największą zaletą opracowanej przez Doktoranta metody pomiarowo - diagnostycznej jest to, że układ pomiarowy nie potrzebuje zewnętrznych czujników drgań i profesjonalnego mocowania czujników do badanej maszyny. Magnesy trwałe oraz uzwojenie wypełniają funkcję czujnika drgań.

Sposób pomiaru i diagnostyki wykorzystuje specyficzne właściwości konstrukcyjne maszyn z magnesami trwałymi, tj. indukowanie się SEM pod wpływem wibracji. Maszyna elektryczna ze wzbudzeniem od magnesów trwałych jest bardzo podobna do elektrodynamicznego czujnika drgań, którego działanie opiera się na tym, że pod wpływem drgań ruchomy magnes, indukuje napięcie wewnątrz cewki zależne od poziomu wibracji. W maszynie z magnesami trwałymi, wirnik z magnesami trwałymi pod wpływem drgań generuje SEM w uzwojeniu. Maszyna do generacji sygnału pomiarowego nie potrzebuje zewnętrznych źródeł zasilania. Czułość układu jest zależna od ilości zwojów uzwojenia. Metoda opiera się na tym, iż przebieg napięcia, bądź prądu maszyny (*sygnały własne* – określenie Doktoranta) poddaje się analizie w dziedzinie częstotliwości, która to analiza pozwala na określenie przyczyn anomalii w maszynie. Doktorant wykonując modele symulacyjne - symulacje komputerowe oraz wykonując badania laboratoryjne określił obszar badań diagnostycznych mający znaczenie w maszynach ze wzbudzeniem od magnesów trwałych. Doktorant zbadał zjawiska generacji drgań oraz emisji hałasów generowanych przez badane maszyny. Wykonane maszyny i ich kolejne wersje pozwoliły na analizę szeregu problemów, które skutkują zwiększoną intensywnością sygnału wibroakustycznego. Poprzez zmiany konfiguracyjne wykonanych stojanów oraz wirników zobrazowane zostały np. wpływ ekscentryczności, czy też asymetrii obciążenia na wzrost wartości generowanych drgań i hałasu.

W ramach doktoratu opracowano konstrukcje modelowych maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi i przeprowadzono ich badania symulacyjne i laboratoryjne. Celem badań było między innymi określenie wpływ momentu zaczepowego oraz różnych rodzajów asymetrii szczeliny powietrznej na drgania. Modele maszyn obejmowały konstrukcje 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 oraz zasilaniu. Modele fizyczne maszyn

zostały wykonane ze wniosłem 132. W rezultacie końcowym przebadano 16 generatorów i 16 silników z magnesami trwałymi.

Zgodnie z art. 13 Ustawy, z dnia 13 marca, 2003 roku, o stopniach naukowych i tytule naukowym rozprawa doktorska powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Problemami naukowymi w recenzowanej pracy są: stworzenie modeli fizykalnych (silniki rzeczywiste plus założenia), modele matematyczne, badania symulacyjne elektromagnetyczne i mechaniczne opisujące siły generujące zjawiska wibroakustyczne w silnikach bezszczotkowych wzbudzanych magnesami trwałymi oraz weryfikacja pomiarowa obliczeń numerycznych. Przedmiotem badań były maszyny elektryczne z magnesami trwałymi o wielkości mechanicznej 132, które zostały wykonane w oparciu o różne kompilacje czterech stojanów oraz sześciu wirników, przebadano 16 generatorów i 16 silników z magnesami trwałymi. Badane przez Doktoranta zjawiska wibroakustyczne są niepożądane w maszynach elektrycznych, a dopuszczalne poziomy hałasu i drgań są podawane w normach i obowiązujących przepisach. Zauważyć należy ich systematyczne zaostżanie. Wibroakustyka maszyny decyduje, w równym stopniu jak jej charakterystyki elektromechaniczne, o jakości maszyny. Ambicją producentów maszyn elektrycznych, wymuszana w głównym stopniu konkurencyjnością rynku, jest oczekiwanie aby parametry wibroakustyczne produkowanych maszyn elektrycznych były możliwe niskie. Dlatego problematyka badawcza recenzowanej pracy doktorskiej jest problematyką ważną, a w silnikach bezszczotkowych jest problematyką nową, gdyż rozwój napędów bezszczotkowych w zakresie małych i średnich mocy trwa dopiero od około 15 lat, gdy magnesy trwałe NdFeB zaczęto produkować na skalę przemysłową.

W pracy doktorskiej przedstawiono wyniki badań kilku problemów szczegółowych:

- Przeprowadzono identyfikację źródeł drgań w wymienionych silnikach,
- Wykonano analizę drgań wybranych rozwiązań konstrukcyjnych silnika przy wymuszeniach mechanicznych i wymuszeniach magnetycznych,
- Badano generatory PM z asymetrycznym obciążeniem oraz silniki PM z asymetrią zasilania. Stwierdzono że w przypadku generatora PM z asymetrycznym obciążeniem oraz silnika PM z asymetrią zasilania następuje wzrost pulsacji momentu, co powoduje uwidocznienie się niektórych składowych prądu i/lub napięcia,
- Badano generatory PM oraz silniki PM z niesymetrią szczeliny powietrznej. W przypadku generatora oraz silnika wzbudzanych magnesami trwałymi z asymetrycznym rozkładem szczeliny powietrznej następuje wzrost pulsacji momentu, co powoduje uwidocznienie się niektórych składowych prądu i/lub napięcia,
- Badano generatory PM oraz silniki PM z niewyważą. W przypadku niewyważenia generatora oraz silnika wzbudzanych magnesami trwałymi następuje wzrost pulsacji momentu, co powoduje uwidocznienie się niektórych składowych prądu i/lub napięcia.
- W ramach realizacji Doktoratu powstało kilkanaście modeli dwu- i trójwymiarowych w środowisku Ansys Maxwell oraz Autodesk Simulation Multiphysics. Wykorzystując opracowane modele przeprowadzono symulacje komputerowe przy użyciu Metody Elementów Skończonych. Modele, tak od strony fizykalnej jak i matematycznej, są poprawne, przyjęte założenia są logiczne i jednoznacznie opisują model fizyczny, który jest przedmiotem badań numerycznych. Wyniki przeprowadzonych symulacji weryfikują się z wynikami pomiarów laboratoryjnych z dostateczną, dla badanych zjawisk, dokładnością.

Przedstawione przez Doktoranta w pracy doktorskiej wyniki badań laboratoryjnych oraz przeprowadzone symulacje komputerowe pozwoliły na wyselekcjonowanie i opisanie równaniami matematycznymi poszczególnych częstotliwości diagnostycznych, których wzrost stanowi swego rodzaju marker dla określonych stanów niepożądanych w maszynach z magnesami trwałymi. Równania zostały przypisane dla następujących anomalii:

- *asymetria obciążenia generatora PM lub zasilania silnika PM,*

$$f_k = (2k - 1) \frac{n \cdot p}{20}$$

- *asymetria rozkładu szczeliny powietrznej (ekscentryczność),*

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

$$f_{k2} = 2k \cdot f$$

- *niewyważenie,*

$$f_1 = \frac{(p-1)f_{H01}}{p}$$

$$f_2 = \frac{(p+1)f_{H01}}{p}$$

gdzie:

f_1, f_2 – szukane częstotliwości, f_{k1}, f_{k2} – szukane częstotliwości dla k -tej składowej, f_k – szukane k -te częstotliwości, f_{H01} – częstotliwość pierwszej harmonicznej badanej maszyny, p – liczba par biegunów, k – liczba naturalna, n – prędkość obrotowa.

Praca jest napisana czytelnie i dobrze zilustrowana rysunkami, które ułatwiają zrozumienie tekstu.

Uwagi dyskusyjne

1. Stosowanie w warunkach przemysłowych opracowanej przez Doktoranta metody pomiarowo – diagnostycznej zdaniem Recenzenta w głównej mierze przynosi korzyść w postaci eliminacji czujnika drgań i wzmacniacza ładunku jeżeli stosujemy akcelerometr. Nie musimy również wykonywać kłopotliwego najczęściej profesjonalnego mocowania czujnika do maszyny. Rezygnacja z czujnika drgań eliminuje kłopotliwe wpływy temperatury i zewnętrznych warunków otoczenia na wynik pomiaru.
2. Zdaniem recenzenta opracowana przez Doktoranta metoda pomiarowo – diagnostyczna nie eliminuje konieczności stosowania aparatury specjalistycznej do analizy sygnału w dziedzinie czasu i częstotliwości w tym przypadku tak zwanych sygnałów własnych. Aparatura ta jest w zasadzie taka sama jak przy analizie sygnału drganiowego.

3. W pkt 1.4. pracy doktorskiej - *Aktualny stan techniki* Doktorant pisze: *Autor przeanalizował liczne prace z zagadnienia diagnostyki maszyn elektrycznych i nie są mu znane publikacje opisujące diagnostykę drganiową bazującą na sygnałach własnych maszyny. Świadczy to o innowacyjności i niestandardowym podejściu do zagadnienia diagnostyki maszyn z magnesami trwałymi. Potwierdza to również sprawdzona czystość patentowa udzielonych autorowi patentów.* Recenzent nie podziela tej opinii. Diagnostykę maszyn elektrycznych można prowadzić na wiele sposobów. Może to być diagnostyka w oparciu o sygnał drganiowy, prądowy, strumień osiowy, wyładowania niezupełne itd. Bardzo bogata jest literatura na ten temat. Nieskromnie powołałam się na monografię własnego autorstwa *Badania, eksploatacja i diagnostyka zespołów maszynowych z silnikami indukcyjnymi klatkowymi*. Wyd. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej 2013, Opole, Studia i Monografie, nr 333. W monografii tej powołuję się na prace zarówno na świecie A. Aleksandrow, A. Barkow, N. Barkowa, W., N Szafranski [5], W. Delaroi [127], W N. Elkasabgy [175], F. Filippetti [185], G..B. Kliman [307], V. Kokko V [311], D.. R Rankin, G. Watt, D. Brown, D. Powell [476], W. T. Thomson [618], jak również i w kraju: M. Antal [674, 675, 676, 677, 678], L. Antal [674, 676], A. Bień [56], A. Biernat [58], A. Bytnar [58], J Czajkowski [56], B. Drak [141, 145], P. Drozdowski [148, 149], P. Dybowski [155, 156, 157, 158, 159], T. Gąsiorowski [199, 200], T. Glinka [200, 214], J Głowacki [219], Z. Gogolewski [221], L. Gołębiowski [224], K Guziec [233], T. Janik [277, 278, 279], G. Kamiński [58], K Kluszczyński [308, 309], Cz., T. Kowalski [320, 321, 325, 327, 424], Z. Kratochwil [329, 330], D. Mazur [373], R. Miksiewicz [309], M. Noga [224, 398, 399,401, 402], A Nykliński [407, 408, 409, 467], M. Pawlak [424] J. Petryna [149, 233, 651], M. Rad [407, 408] W. Rams [159, 401, 407, 409, 466, 467, 468, 469, 470, 471, 472, 474], S. Rawicki [478], A. Różycki [277, 485] J. Rusek [159, 219, 401, 402, 409, 468, 469, 470, 471, 472, 474, 486, 487, 488, 489, 490, 492, 493, 494, 495], R. Rut [141, 221, 278, 279, 496], J. Sieniawski [467], J Skwarczyński [401, 468, 469, 465], T. Sobczyk [529, 530, 531, 532, 535, 536, 537], M. Sułowicz [535, 536, 552, 650, 651], A. Warzecha [535, 536], K. Weinreb [148, 149, 233, 529, 530, 535, 536, 552, 644, 645, 650, 651], T. Węgiel [535, 536, 552, 650], M Wierzcholski M [470, 473], J. Zawilak [674, 675, 676, 677, 678], P. Zuziak [698]. Prace te dotyczą wykorzystania do diagnostyki maszyn elektrycznych sygnału prądowego, strumienia osiowego (napięcie z cewek pomiarowych). Obecnie większość komercyjnych analizatorów diagnostycznych i zbieraczy danych wyposażonych jest w moduł diagnostyki drganiowej i prądowej maszyn w czasie normalnej pracy. Opcje taką posiadają wszystkie współczesne analizatory i zbieracze danych oraz systemy diagnostyczne i pomiarowe. Recenzent korzysta na co dzień z takich rozwiązań i diagnozuje zespoły maszynowe napędzane silnikami klatkowymi w oparciu o sygnał prądowy – prąd stojana silnika mierzony jest cewką Rogowskiego. Diagnozuję anomalie drganiowe w oparciu o sygnał prądowy. Są to anomalie typu: niewyważa, nieosiowość, uszkodzenie łożysk tocznych, uszkodzenie klatki silnika. Proszę Doktoranta o komentarz do tych faktów.
4. Czy Doktorant badał najczęściej występujące stany anomalii w maszynach i w zespołach maszynowych określane jako; uszkodzenie łożysk oraz nieosiowość ?
5. Proszę dokładniej opisać zastosowany w badaniach stół wibracyjny, proszę podać jego podstawowe charakterystyki w tym charakterystykę przyspieszenia drgań w funkcji częstotliwości drgań przy stałej sile, parametry częstotliwościowe itd.
6. W pracy znalazłem szereg błędów stylistycznych, edytorskich i interpunkcyjnych, które nie wpływają na ostateczną pozytywną ocenę pracy i nie będę ich zamieszczał. Zwracam natomiast uwagę na pewne uchybienia i podaję ich przykłady:

- błędy formalne (np. str.7 pkt 1.1.1. *Łożyska, wytyczne PN oraz ISO*, pasmo pomiarowe, kiedyś było 1000Hz, obecnie jest inne)
- błędy stylistyczne (np. str. 10, *metoda detekcji obwiedni*, opis metody);
- niezręczności językowe (np. str.7, *diagnostyka monitorująca*);
- brak powołań na literaturę, bardzo liczne, np. - str. 8 tabela 1.1, str.13 tekst *metody wyważania..*, str.13 tekst *zasada symetrii..*, str. 14 pkt 1.1.6 tekst *posadowienie*,

Uwagi powyższe nie umniejszają wartości naukowej pracy doktorskiej, którą oceniam bardzo dobrze, gdyż wnosi ona znaczący wkład w rozpoznanie i badanie drgań w maszynach wzbudzanych magnesami trwałymi.

Konkluzja

Mgr inż. Marcin Barański prowadził badania pod opieką, doświadczonego w eksperymentach laboratoryjnych i przemysłowych, promotora dr hab. inż. Jakuba Bernatta, prof. KOMELU i promotora pomocniczego dr inż. Artura Polaka pracownika KOMELU. Doktorant ma w dorobku naukowym (7) publikacji, w tym (3) współautorskie. Publikacje Doktoranta opublikowano w wydawnictwach z listy MNiSW (2), z listy filadelfijskiej (1), w materiałach z konferencji międzynarodowych (4). Doktorant jest również współautorem (3) patentów. Współautorstwo w publikacjach i w patentach, jest oczywiste, gdyż Doktorant pracuje w Zespole, a badania swoje prowadzi, w dużym stopniu, w laboratorium badawczym i w przemyśle na silnikach fizycznych.

Wyniki rozważań zawarte w rozprawie upoważniają do stwierdzenia, iż została udowodniona teza oraz osiągnięto założone cele pracy. Postawione zadanie w pełni zostało zrealizowane na drodze analizy zjawisk fizycznych, symulacji komputerowych i badań laboratoryjnych.

Uważam, że praca stanowi samodzielne rozwiązanie przez Autora zagadnienia naukowego przy użyciu nowoczesnych metod badawczych.

Rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Barańskiego pt. „Diagnostyka drgań w maszynach elektrycznych z magnesami trwałymi wykorzystująca sygnały własne, według mojej oceny, spełnia wymagania art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym. Wnioskuje o dopuszczenie Doktoranta do jej publicznej obrony.

Stanisław Jędrzejewski