

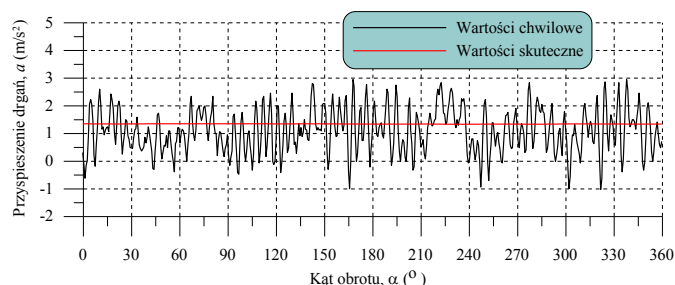
BEZCZUJNIKOWA DIAGNOSTYKA DRGANIOWA MASZYN ELEKTRYCZNYCH Z MAGNESAMI TRWAŁYMI - PRZYKŁAD EKSCENTRYCZNOŚCI

Streszczenie

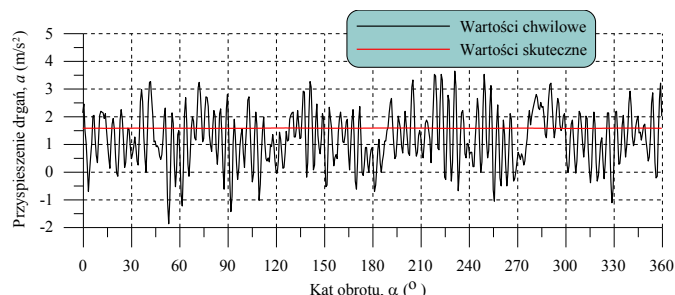
W artykule przedstawiono drganiową metodę diagnozowania silników trakcyjnych wzbudzanych magnesami trwałymi, które są wykorzystywane m.in. w pojazdach elektrycznych. Metoda wykorzystuje właściwości maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi, a mianowicie zjawisko indukowania się napięcia w uzwojeniu twornika pod wpływem drgań mechanicznych wirnika względem stojana. W pracy przedstawiono model polowo – obwodowy, wyniki badań statycznych, wyniki obliczeń oraz symulacji mających na celu detekcję częstotliwości, które odpowiadają wibracjom, wymuszonym asymetrią geometrii promieniowej między stojanem, a wirnikiem.

WSTĘP

Ekscentryczność w maszynie elektrycznej jest zjawiskiem bardzo niepożądanym i może doprowadzić do poważnej awarii całego napędu, dlatego powinno się temu przeciwdziałać. W innym razie uszkodzenie będzie się pogłębiać. Mimośrodowość może powstawać już na etapie wytwarzania danej maszyny i nie wyklucza ono pracy maszyny, jednak będzie się to objawiać wahaniami głównie w momencie elektromagnetycznym. Pulsacje będą powodowały wzrost poziomu wibracji oraz hałasu – patrz rysunki 1 i 2 oraz tabela 1.



Rys. 1. Przebieg przyspieszenia drgań w funkcji kąta obrotu – symetria maszyny



Rys. 2. Przebieg przyspieszenia drgań w funkcji kąta obrotu – ekscentryczność

Tab. 1. Porównanie wartości przyspieszenia drgań maszyny symetrycznej oraz z wprowadzoną ekscentrycznością

Stan obciążenia generatora	a	a_{max}
	m/s^2	m/s^2
Symetria	1,32	2,94
Ekscentryczność	1,56	3,62

Wzrost drgań w maszynie elektrycznej jest zazwyczaj symptomem uszkodzenia. Zignorowanie objawów zwykle doprowadza do awarii, której koszty mogą przewyższyć koszt urządzenia [1]-[3], [5].

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 drganiowej metody diagnostycznej jest to, że układ pomiarowy nie potrzebuje zewnętrznych czujników drgań [14]-[15]. 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. Czulość układu w obu przypadkach jest zależna od ilości zwojów uzwojenia [3], [5].

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 [1]-[3], [6].

1. EKSCENTRYCZNOŚĆ

Ekscentryczność zwana również mimośrodowością powoduje nierównomierny rozkład szczeliny powietrznej. Rozróżnia się trzy rodzaje:

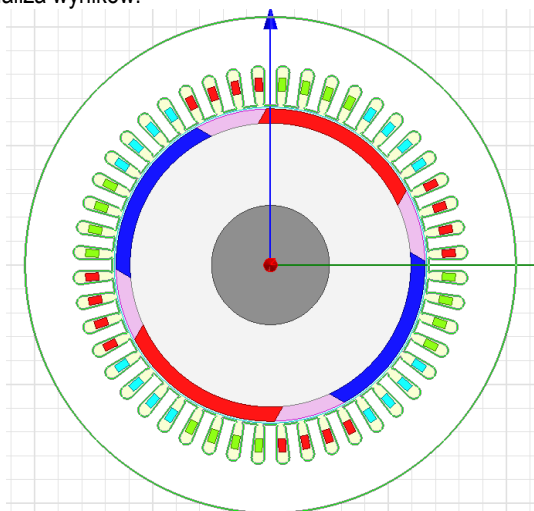
- statyczna,
- dynamiczna,
- mieszana.

Asymetria geometrii promieniowej statyczna charakteryzuje się tym, że położenie maksymalnej szczeliny na obwodzie maszyny jest stałe i może wynikać z owalności rdzenia, bądź niewłaściwego montażu. W przypadku asymetrii dynamicznej położenie maksymalnej szczeliny zmienia się wraz z pozycją wirnika i może wynikać z zużycia się węzłów łożyskowych, zgiętego wału, itp. [7]. Najczęściej jest więc spowodowana zużyciem się maszyny podczas jej eksploatacji. Mieszana jest połączeniem obu powyższych [12].

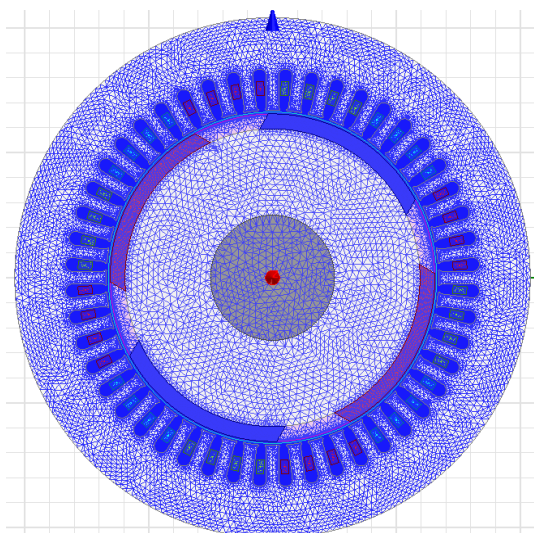
2. MODEL POLOWO – OBWODOWY

Model polowo – obwodowy wraz z siatką dyskretyzacyjną badanej maszyny został przedstawiony na rysunkach 3 oraz 4. Analizę przeprowadzono w środowisku Ansys Maxwell 2D. Jest to program, który wykorzystuje MES i służy do rozpatrywania dwuwymiarowych pól elektromagnetycznych o niskiej częstotliwości [4], [13]. Na proces tworzenia i analizy modelu maszyny składają się następujące kroki:

- stworzenie modelu,
- definicja warunków brzegowych,
- określenie właściwości materiałowych poszczególnych elementów modelu,
- definicja wzbudzenia układu – pogrupowanie poszczególnych uzwojeń oraz określenie wymuszeń,
- zamodelowanie siatki elementów skończonych,
- parametry symulacji,
- symulacja modelu,
- analiza wyników.



Rys. 3. Model 2D maszyny z magnesami trwałymi



Rys. 4. Siatka elementów skończonych modelu 2D

3. WYNIKI SYMULACJI, OBLICZEŃ ORAZ BADAŃ LABORATORYJNYCH

Na rysunkach 5–8 oraz w tabelach 2 i 3 przedstawiono wyniki symulacji oraz kalkulacji dla maszyny wzbudzonej za pomocą magnesów trwałych. Jest to porównanie rezultatów symetrycznej maszyny z maszyną posiadającą ekscentryczność. Do symulacji użyto

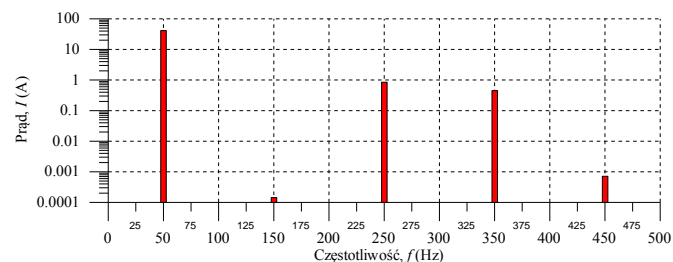
modelu maszyny typu PMzsg132M-4 o parametrach: $P = 6,0$ kW, $U = 84$ V, $I = 41,2$ A, $n = 1500$ 1/min. Symulacje wykonano dla 80% asymetrii promieniowej. Można zaobserwować pojawienie się dodatkowych częstotliwości. Analizując wyniki symulacji autor opisał równaniami pojawiające się dodatkowe harmoniczne (1), (2):

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

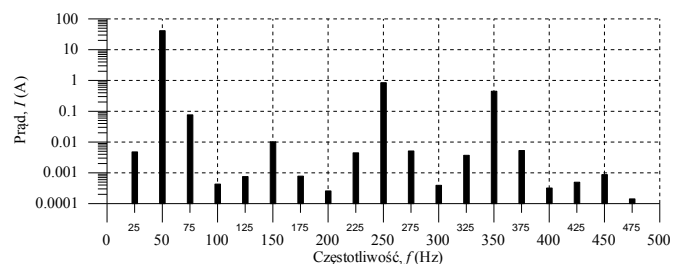
$$f_{k2} = 2k \cdot f \quad (2)$$

gdzie:

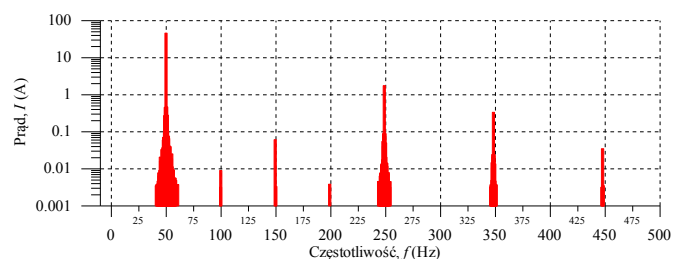
f_{k1}, f_{k2} – szukane częstotliwości dla k-tej harmonicznej,
 p – liczba par biegunów,
 f – częstotliwość pierwszej harmonicznej badanego generatora,
 k – liczba naturalna.



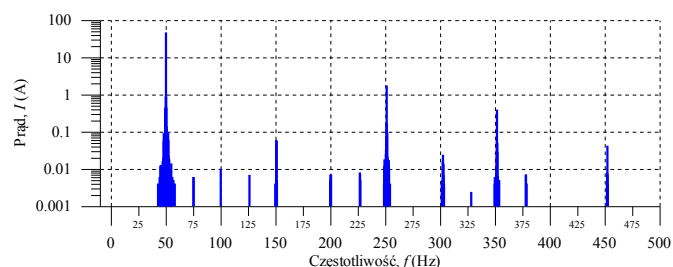
Rys. 5. Analiza częstotliwościowa prądu maszyny symetrycznej – wynik symulacji



Rys. 6. Analiza częstotliwościowa prądu maszyny z ekscentrycznością – wynik symulacji



Rys. 7. Analiza częstotliwościowa prądu maszyny symetrycznej – wynik badań laboratoryjnych



Rys. 8. Analiza częstotliwościowa prądu maszyny z ekscentrycznością – wynik badań laboratoryjnych

Tab. 2. Zestawienie wyników symulacji oraz obliczeń oraz symulacji maszyny PMzsg132M-4

Częstotliwość otrzymana w wyniku symulacji f (Hz)	Częstotliwość otrzymana w wyniku obliczeń (1), (2) f (Hz)	Odchylenie (%)
25,10	25,05	0,20
75,10	75,15	0,07
100,10	100,20	0,10
125,10	125,25	0,12
150,10	150,30	0,13
175,10	175,35	0,22
200,10	200,40	0,15
275,10	275,55	0,16
300,10	300,60	0,17
325,10	325,65	0,17
375,10	375,75	0,17
400,10	400,80	0,17
425,10	425,85	0,18
475,10	475,95	0,18

Tab. 3. Zestawienie wyników badań laboratoryjnych oraz obliczeń oraz symulacji maszyny PMzsg132M-4

Częstotliwość otrzymana w wyniku badań laboratoryjnych f (Hz)	Częstotliwość otrzymana w wyniku obliczeń (1), (2) f (Hz)	Odchylenie (%)
75,61	75,56	0,01
126,42	125,93	0,39
200,81	201,48	0,33
227,03	226,68	0,15
302,74	302,22	0,17
328,54	327,42	0,34
378,45	377,80	0,17

PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wyniki obliczeń, badań laboratoryjnych oraz symulacji maszyny PMzsg132M-4. Określono częstotliwości, które zwiększają swój poziom w maszynie PM posiadającą asymetrię geometrii promieniowej między stojanem a wirnikiem. Badania laboratoryjne, obliczenia oraz symulacje w środowisku Ansys Maxwell 2D potwierdzają możliwość użycia przedstawionej diagnostycznej metody drganiowej dla maszyn wzbudzanych magnesami trwałymi pod kątem detekcji mimośrodowości. Dla rozpatrywanego zakresu częstotliwości różnice między wynikami kalkulacji, a symulacjami są nie duże (<0,25%). Natomiast różnice między badaniami laboratoryjnymi, a obliczeniami są mniejsze niż 0,4%. Porównując wyniki badań laboratoryjnych z wynikami symulacji oraz obliczeniami można zauważyć, że nie wszystkie wyznaczone częstotliwości za pomocą algorytmów obliczeniowych ujawniły się w rzeczywistości – przyczyną może być fakt, że rzeczywista maszyna nigdy nie jest idealna i pozostałe częstotliwości występowały na poziomie szumów. Otrzymane rezultaty świadczą o poprawności przyjętego sposobu wyznaczania częstotliwości odpowiadających zwiększonemu poziomowi drgań powstałych na skutek ekscentryczności. Należy jednak pamiętać, że większość silników z magnesami trwałymi współpracuje z falownikami i przed analizą częstotliwościową należy badany przebieg poddać odpowiedniej filtracji [9]-[11]. Przy zastosowaniu odpowiednich algorytmów do wyznaczania FFT metoda może być również używana on – line [8].

INFORMACJA

Praca jest 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”.

BIBLIOGRAFIA

1. Barański M., Glinka T., Vibration diagnostic method of permanent magnets generators – detecting of vibrations caused by unbalance, PL Patent application P.405669, 2014.
2. Barański M., Glinka T., Vibration diagnostic method of permanent magnets generators – detecting of vibrations caused by load asymmetry, PL Patent application P.411942, 2015.
3. Barański M., New vibration diagnostic method of PM generators and traction motors – detecting of vibrations caused by unbalance, Energy Conference (ENERGYCON), IEEE International, IEEEExplore, 28-32, 2014.
4. Barański M., Jarek T., Electrical machine with permanent magnets as a vibration sensor - a test stand model, Electrical Machines (ICEM), International Conference on, IEEEExplore, 1492-1495, 2014.
5. Barański M., Decner A., Polak A., Jarek T., Selected Diagnostic Methods of Electrical Machines Operating in Industrial Conditions, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 5(21), 2047-2054, 2014.
6. Barański M., Będkowski B., Analysis of PMSM Vibrations Based on Back-EMF Measurements, Electrical Machines (ICEM), International Conference on, IEEEExplore, 1590-1593, 2014.
7. Chun-yao Lee, Yu-Hua Hsieh, Bearing Damage Detection of BLDC Motors Based on Current Envelope Analysis, Measurement Science Review, (6)12, 2012.
8. Decner A., Remote monitoring of electric machines, Maszyny Elektryczne: Zeszyty Problemowe, 2011.
9. Maciążek M., Pasko M., Grabowski D., Active power filters-optimization of sizing and placement, Technical Sciences, 2013.
10. Maciążek M., Pasko M., Prediction in control systems of active power filters, Poland, Przegląd Elektrotechniczny, 2010.
11. Maciążek M., Pasko M., Bula D., Optimization of time in Active Power Filter control, 8th International Workshop OPEE, 2007.
12. Mazur D.: Wpływ ekscentryczności wirnika oraz rozmieszczenia magnesów trwałych na wirniku na moment zaczepowy oraz elektromagnetyczny generatora wielobiegunowego wolnoobrotowego, Przegląd Elektrotechniczny, Poland, 2014.
13. Pistelok P., Kądziółka T., New series of high efficiency 2-pole synchronous generator with permanent magnets, Maszyny Elektryczne: Zeszyty Problemowe, 100, 2013.
14. Szymaniec S., Podhajecki J., Determination natural frequencies of stator induction machine, Maszyny Elektryczne: Zeszyty Problemowe, 87, 2010.
15. Szymaniec S., Natural vibrations of squirrel-cage induction motor stator of low power - measurements, Maszyny Elektryczne: Zeszyty Problemowe, 3, 2012.

THE SENSORLESS VIBRATION DIAGNOSTIC OF PM ELECTRICAL MACHINES – EXAMPLE OF ECCENTRICITY

Abstract

This article presents a vibration diagnostic method designed for permanent magnets (PM) traction motors. Those machines are commonly used in traction drives of electrical vehicles. Specific structural properties of machines excited by permanent magnets are used in this method - electromotive force (EMF) generated due to vibrations. This work presents: field-circuit model, results of static tests, results of calculations and simulations.

Autor:

Marcin Barański - Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych Komel, Laboratorium Maszyn Elektrycznych, Specjalista Badawczo Techniczny, Katowice, Al. Rozdzieńskiego 188, Polska (email: m.baranski@komel.katowice.pl).