

Tomasz Jarek

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

WYBRANE METODY BADAŃ MASZYN ELEKTRYCZNYCH Z MAGNESAMI TRWAŁYMI

SELECTED METHOD OF PERMANENT MAGNET ELECTRICAL MACHINES TESTS

Streszczenie: W artykule zostały przedstawione wybrane metody diagnostyki stanu technicznego maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi. Uwaga została skupiona na sposobie wykrywania drgań maszyny z magnesami trwałymi na podstawie generowanego napięcia, a także na metodzie diagnozowania stanu izolacji głównej uzwojeń maszyny. W celu analizy drganiowej zostały przeprowadzone pomiary oraz symulacje komputerowe, których wyniki zostały przedstawione w postaci widm częstotliwościowych, a także w postaci hodografów wektora przestrzennego generowanego napięcia.

Abstract: In this article issues related to the diagnostics of permanent magnet synchronous machines have been presented. Attention has been focused on the method of vibrations detection of machine with permanent magnets based on the generated voltage and also a method to diagnose the condition of the main winding insulation. In order to analyze the vibration measurements and computer simulations have been carried out. The results are presented in the frequency spectrum and as a hodograph of generated voltage space vector.

Słowa kluczowe: *maszyny elektryczne z magnesami trwałymi, izolacja główna, badania diagnostyczne*
Keywords: *permanent magnet electrical machines, winding insulation, diagnostic tests*

1. Wstęp

Każdy silnik elektryczny wchodzący w skład dowolnego napędu elektrycznego powinien charakteryzować się dobrym stanem technicznym. Ciągłe utrzymywanie stanu technicznego na odpowiednim poziomie zwiększa niezawodność zespołu minimalizując ryzyko wystąpienia awarii. Wiąże się to z prowadzeniem systematycznych badań diagnostycznych. Długotrwała obserwacja parametrów określających stan techniczny maszyny pozwala wyznaczyć tendencję zmian, przewidzieć zbliżającą się awarię i zabezpieczyć przed groźnymi jej skutkami.

Szczególną uwagę należy skierować na maszyny zainstalowane w strategicznych napędach linii produkcyjnych, gdzie awaria maszyny i jej wymiana wiąże się z olbrzymimi kosztami ze względu na zatrzymanie linii i przerwanie procesu technologicznego.

Poza najbardziej popularnym rodzajem maszyn elektrycznych, jakim ciągle pozostaje maszyna indukcyjna, w coraz szerszym zakresie stosowane są maszyny wzbudzone magnesami trwałymi. Jednym z popularnych zastosowań takich maszyn są napędy samochodów elektrycznych [1], [2] – przemawiają za tym takie zalety jak duży stosunek mocy do gabarytów oraz dobre parametry ruchowe. Maszyny z ma-

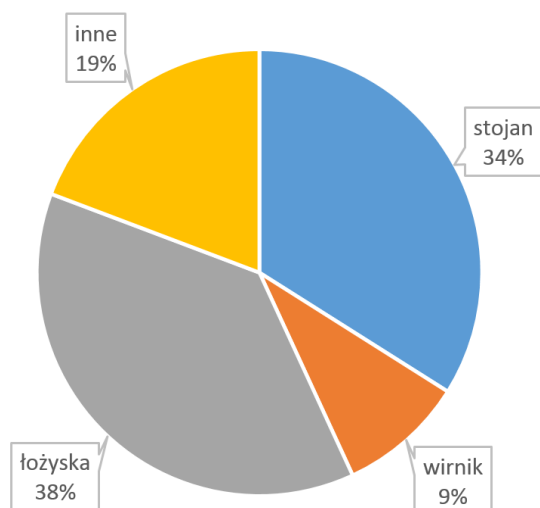
gnesami trwałymi są również często wykorzystywane jako generatory w małych elektrowniach wiatrowych oraz wodnych [3], [4].

2. Uszkodzenia maszyn z magnesami trwałymi

W przypadku maszyny elektrycznej wzbudzonej magnesami trwałymi, podobnie jak dla każdego innego rodzaju wirującej maszyny elektrycznej, możemy wyróżnić następujące uszkodzenia:

- elektryczne: zwarcie międzyzwojowe, zwarcie uzwojenia do masy, przerwa w uzwojeniu;
- mechaniczne: ekscentryczność statyczna i dynamiczna wirnika, niewywaga wirnika oraz uszkodzenia łożysk.

Dodatkowo, w omawianych maszynach mogą ulec uszkodzeniu magnesy trwałe: odklejenie lub odłamanie, a także ich demagnetyzacja (np. na skutek wysokiej temperatury). Udział występowania uszkodzeń w poszczególnych częściach maszyny elektrycznej został przedstawiony na rysunku 1 [5].



Rys. 1. Miejsca występowania uszkodzeń w maszynach elektrycznych

3. Metody diagnostyki maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi

Opisane w poprzednim punkcie uszkodzenia maszyn mogą objawiać się na różne sposoby. Na przestrzeni lat zostały opracowane metody mające na celu ich detekcję. Do metod diagnostyki należą m.in.: analiza drganiowa, analiza prądów (napięć), analiza rozkładu temperatury, pomiar wyładowań niepełnych i pomiary akustyczne.

W niniejszym artykule zostały przedstawione informacje dotyczące detekcji drgań oraz określenia stanu technicznego izolacji głównej maszyny z magnesami trwałymi.

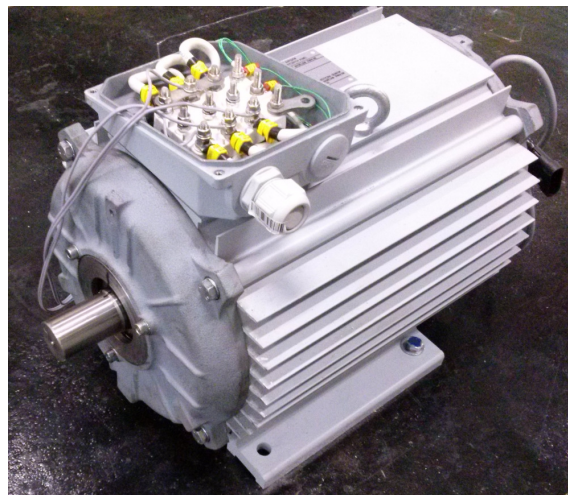
3.1. Maszyna z magnesami trwałymi jako czujnik drgań

Z uwagi na fakt, że w maszynach synchronicznych z magnesami trwałymi pole magnetyczne (strumień wzbudzenia) wytworzone jest przez magnesy trwałe, pojawiają się nowe możliwości diagnozowania tych maszyn. Podczas pomiaru rezystancji uzwojeń maszyny z magnesami trwałymi można zauważyć, że nawet niewielkie drgania maszyny (na skutek drgań podłoża) mogą uniemożliwić poprawny pomiar – wartość mierzonej rezystancji zmienia się w czasie. Powodem jest generowanie się niewielkiego napięcia w uzwojeniu. Zjawisko to jest szczególnie widoczne dla maszyn o większej liczbie biegunów.

Porównując maszynę z magnesami trwałymi do elektrodynamycznego czujnika drgań można zauważyć parę cech wspólnych – m.in. w ich budowie można wyróżnić co najmniej jeden ma-

gnę, który przemieszcza się względem cewki (uzwojenia) generując w ten sposób SEM.

W celu przeprowadzenia analizy pod kątem wykrywania drgań na podstawie generowanego napięcia została zaprojektowana i wykonana 3-fazowa maszyna synchroniczna z magnesami trwałymi przedstawiona na rysunku 2 o danych zestawionych w tabeli 1.

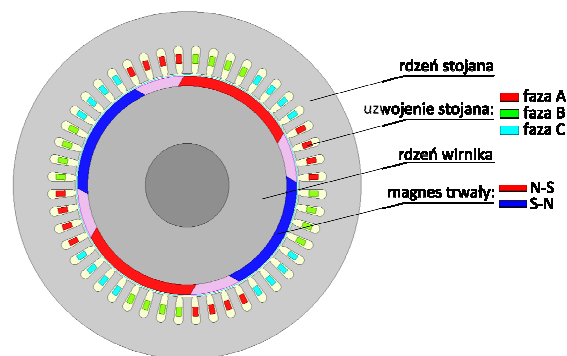


Rys. 2. Obiekt badań

Tabela 1.

| | | |
|---------------------|-------|--------------|
| Moc znamionowa | P_N | 6.0 kW |
| Prędkość znamionowa | n_N | 1500 obr/min |
| Napięcie znamionowe | U_N | 65 V |
| Liczba biegunów | $2p$ | 4 |
| Wznios | H | 132 mm |

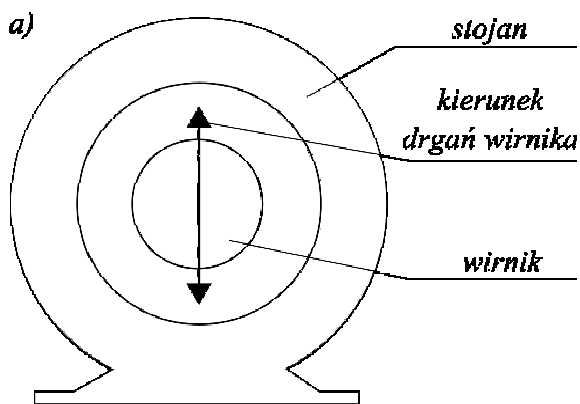
Do celów symulacyjnych powstał dwuwymiarowy model w programie wykorzystującym metodę elementów skończonych Ansys Maxwell. Otrzymany model wraz z opisem został przedstawiony na rysunku 3.



Rys. 3. Model 2D analizowanej maszyny

Pod wpływem drgań maszyny może zmieniać się wzajemne położenie wirnika z magnesami

trwałymi względem stojana. W niniejszym artykule ograniczono się do ruchu harmonicznego wirnika względem stojana w kierunku prostopadłym do osi maszyny (rysunek 4).



Rys. 4. Kierunek drgań wirnika

Szczególnym przypadkiem takiego wirnika są drgania maszyny wywołane niewywagą wirnika. W publikacji [6] została przedstawiona metoda detekcji niewywagi na podstawie analizy częstotliwościowej napięcia generatora. Jak zostało to wykazane na podstawie zarówno pomiarów laboratoryjnych, jak i symulacji komputerowych, w widmie napięcia na zaciskach podczas niewywagi maszyny pojawiają się składowe, których częstotliwości można wyznaczyć na podstawie wzorów [6]:

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

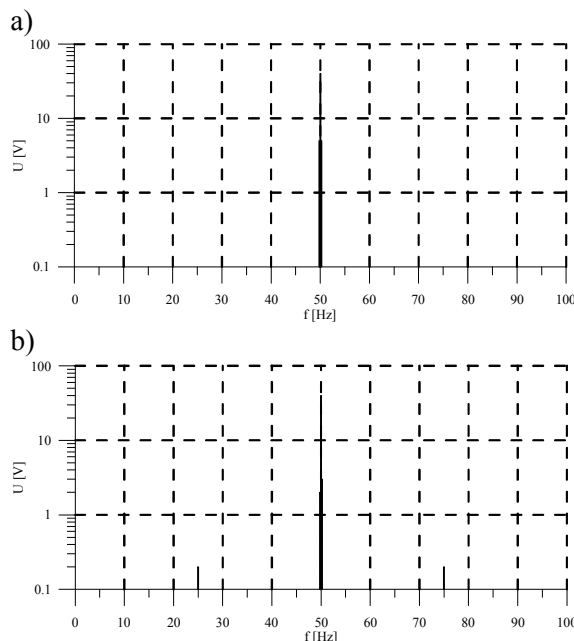
$$f_2 = \frac{(p+1)f}{p} \quad (2)$$

gdzie:

f_1, f_2 – częstotliwości widma napięcia występujące przy niewywadze wirnika,
 p – liczba par biegunów,
 f – częstotliwość pierwszej harmonicznej napięcia generowanego podczas pracy generatora.

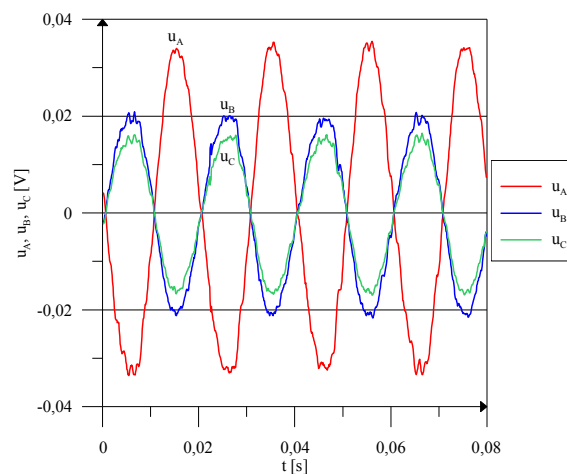
Wyniki symulacji maszyny z niewywagą wirnika zostały porównane z przypadkiem bez niewywagi w formie wykresu na rysunku 5. Jak można zauważyć, w przypadku niewywagi występują harmoniczne o częstotliwościach 25 i 75 Hz, zgodnie ze wzorami (1) i (2).

Wyniki pomiarów generowanych napięć fazowych podczas harmonicznego ruchu niewirującego wirnika (dla przypadkowego kąta położenia wirnika względem stojana) zostały przedstawione na rysunku 6.



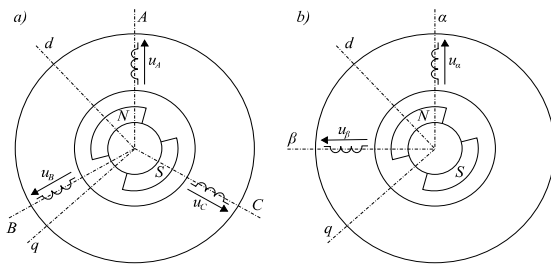
Rys. 5. Widmo częstotliwościowe generowanego napięcia dla przypadku bez niewywagi (a) i z niewywagą (b)

Częstotliwość drgań badanej maszyny oraz częstotliwość generowanego napięcia są równe i wynoszą 50 Hz.



Rys. 6. Przebiegi napięć fazowych generowanych podczas drgań maszyny – wyniki pomiarów

Inną formą prezentacji generowanego pod wpływem drgań napięcia jest hodograf wektora przestrzennego. Symetryczny układ 3-fazowy możemy przedstawić w postaci równoważnego układu 2-fazowego – w układzie ortogonalnym (rysunek 7).



Rys. 7. Interpretacja układu 3-fazowego (a) oraz układu ortogonalnego (b)

Wektor przestrzenny napięcia można otrzymać dokonując następujących działań matematycznych [7]:

$$\underline{u} = \frac{2}{3} [u_A(t) + \underline{a}u_B(t) + \underline{a}^2u_C(t)] \quad (3)$$

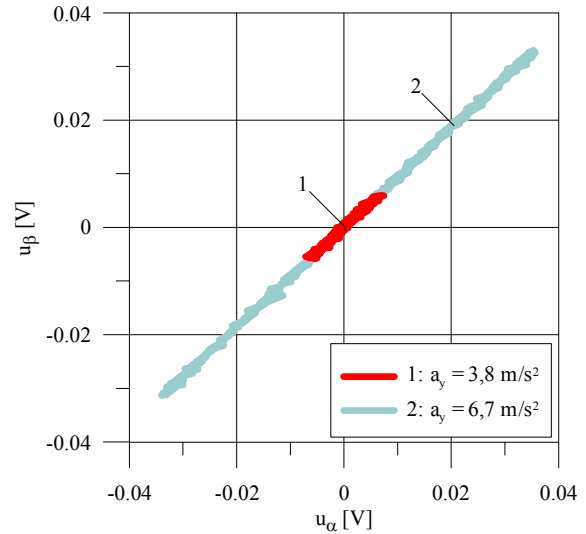
$$\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (4)$$

$$u_\alpha = \text{Re}(\underline{u}) = \frac{2}{3} \left(u_A - \frac{u_B + u_C}{2} \right) = u_A \quad (5)$$

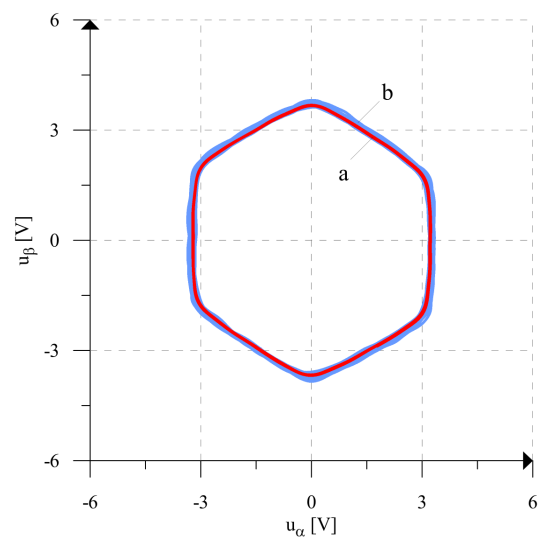
$$u_\beta = \text{Im}(\underline{u}) = \frac{u_B - u_C}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

Wyniki pomiarów generowanych napięć dla wariantu harmonicznego ruchu niewirującego wirnika względem stojana przy różnych przyspieszeniach drgań maszyny a_y zostały przedstawione w postaci hodografów na rysunku 8. Pomiary w obydwóch przypadkach zostały przeprowadzone przy jednakowych położeniach kątowych wirnika. Intensywność drgań maszyny ma widoczny wpływ na rozmiar otrzymanej figury – wraz ze wzrostem drgań maszyny rośnie jej długość. Dla różnych kątów położenia wirnika względem stojana zmienia się kąt nachylenia hodografu.

Drugim przypadkiem, dla którego zostały wykonane pomiary, jest ruch harmoniczny obracającego się wirnika względem stojana (kierunek drgań prostopadły do osi wału i niezmienny w czasie). Wyniki zostały przedstawione na rysunku 9 i porównane z przypadkiem braku drgań wirnika (dla jednakowych prędkości obrotowych). Jak można zauważyć, otrzymane hodografy mają również zbliżony kształt, lecz wariant drgającego wirnika cechuje się grubszą krawędzią otrzymanej figury.



Rys. 8. Hodografy wektora przestrzennego generowanego napięcia dla różnych prędkości drgań maszyny



Rys. 9. Hodografy wektora przestrzennego napięcia podczas ruchu obrotowego wirnika dla przypadku bez (a) i z drganiami (b)

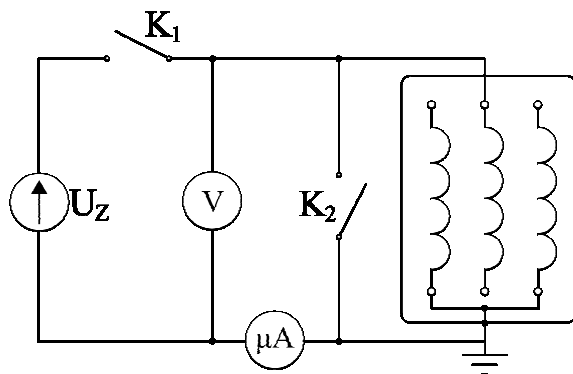
3.2. Badania diagnostyczne izolacji głównej uzwojenia

Do jednej z najprostszych metody diagnostyki izolacji głównej uzwojenia maszyny można zaliczyć metodę napięcia stałego [8]. Składa się ona z trzech podstawowych punktów:

- wykreślenie charakterystyki $R_{60} = f(U)$ – w ramach możliwości w zakresie od 0 do $2U_N$,
- określenie charakterystyki prądu upływu w funkcji czasu $i_p = f(t)$ po podaniu znamionowego napięcia na całkowicie rozładowany układ elektroizolacyjny uzwojenia,
- określenie charakterystyki czasowej napięcia odbudowy $U_{odb} = f(t)$ w układzie elektroizola-

cyjnym uzwojenia po zwarceniu naładowanego do napięcia znamionowego układu na czas t_z i rozwarciu układu.

Schemat układu pomiarowego służącego do przeprowadzenia powyższych trzech punktów został przedstawiony na rysunku 9. W jego skład wchodzi źródło napięcia stałego U_z , dwa łączniki K_1 i K_2 oraz woltomierz V i mikroamperomierz μA .



Rys. 10. Schemat układu do diagnostyki izolacji głównej uzwojenia

Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów dokonuje się oceny stanu technicznego izolacji głównej uzwojenia maszyny. Parametry, które zostają poddane ocenie w skali od 0 do 5 (5 oznacza bardzo dobry stan izolacji, 0 – uszkodzenie izolacji) to:

- napięcie przebicia U_p/U_N ,
- rezystancja R_{60N}/U_N ,
- czas zwarcia t_z ,
- maksymalna wartość odbudowanego napięcia U_{odmax}/U_o ,
- czas odbudowy napięcia t_{od} ,
- wahania prądu upływu dla U_N ,
- współczynnik absorpcji i_{p15}/i_{p60} .

4. Podsumowanie

Zaprezentowana w artykule metoda diagnostyki wibracji maszyny elektrycznej z magnesami trwałymi nie wymaga dodatkowych, skomplikowanych czujników drgań. Wykorzystując sygnały własne (takie jak np. generowane napięcie) można wstępnie określić, czy badana maszyna (czasem trudno dostępna) nie jest narażona na nadmierne drgania. Ich występowanie może świadczyć m.in. o błędnym sprzęgnięciu maszyny z napędem lub uszkodzeniu łożysk.

Z uwagi na fakt, że większość maszyn z magnesami trwałymi współpracuje z przemiennikami częstotliwości, są one bardziej narażone na uszkodzenia układu elektroizolacyjnego. Dlatego też ważnym aspektem utrzymania ma-

szyn z magnesami trwałymi w dobrym stanie technicznym są regularne badania diagnostyczne szczególnie izolacji uzwojeń.

5. Literatura

- [1]. R. Rossa: "Zaawansowane rozwiązania techniczne w napędzie elektrycznym „E-Kit” dla miejskiego samochodu osobowego", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 102, str. 145 -149, 2014.
- [2]. A. Białas, E. Król: „Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi w napędzie pojazdu hybrydowego”, *Napędy i Sterowanie*, nr 11, 2014
- [3]. Z. Goryca, M. Malinowski, A. Pakosz: "Wolnoobrotowa prądnica do elektrowni wiatrowej lub wodnej", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 96, str. 171 -174, 2014.
- [4]. P. Pistelok, R. Rossa: "Małe elektrownie wodne jako źródło energii odnawialnej", *Rynek Energii*, 2014.
- [5]. Y. Da, X. Shi, M. Krishnamurthy: "Health Monitoring, Fault Diagnosis and Failure Prognosis Techniques for Brushless Permanent Magnet Machines".
- [6]. M. Barański: "Nowa metoda wykrywania drgań wzbudzanych niewyważą – diagnostyka generatorów z magnesami trwałymi", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 101, str. 25 -30, 2014.
- [7]. R. Krishnan: "Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives", *CRC Press/Taylor & Francis*, 2010.
- [8]. T. Glinka, A. Polak, A. Decner: "Obserwacja procesu starzenia izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych z wykorzystaniem metody napięcia stałego", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 76, str. 121 -125, 2007.

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".