

Marcin Barański, Adam Decner
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

DIAGNOSTYKA MASZYN ELEKTRYCZNYCH Z MAGNESAMI TRWAŁYMI – METODY WYBRANE

PM ELECTRICAL MACHINES DIAGNOSTIC - SELECTED METHODS

Streszczenie: Artykuł przedstawia metody diagnostyczne, które mogą być zastosowane do określenia stanu technicznego silników i generatorów z magnesami trwałymi, wykorzystywanymi, m.in. w elektrowniach wodnych i wiatrowych oraz napędach trakcyjnych pojazdów elektrycznych. Opisywane metody wykorzystywane są przez autorów w czasie okresowych badań diagnostycznych. W artykule zwrócono szczególną uwagę na metodę diagnostyki drganiowej oraz diagnostykę izolacji zwojowej, gdyż obie zostały opracowane w Instytucie KOMEL. Metoda dotycząca diagnostyki drganiowej wykorzystuje specyficzne właściwości konstrukcyjne maszyn ze wzbudzeniem od magnesów trwałych, mianowicie indukowanie się SEM pod wpływem drgań. Autorzy przedstawiają podobieństwo maszyny z magnesami trwałymi do czujnika elektrodynamicznego oraz wyniki symulacji i badań laboratoryjnych maszyn z magnesami trwałymi, w których zwiększony poziom wibracji spowodowany był niewyważą.

Abstract: This article presents a several diagnostic methods that can be used to determine the technical condition of electrical machines, especially permanent magnets (PM) machines. Those machines are commonly used in small wind and water systems and vehicles drives. Those methods are preferred by the author in periodic diagnostic of electrical machines. The special attention should be paid for diagnostic methods of turn-to-turn insulation and vibrations. Both of those methods were invented in the Institute of Electrical Drives and Machines Komel. Specific structural properties of machines excited by permanent magnets are used in vibration method - electromotive force (EMF) generated due to vibrations. Authors present similarity of machine excited by permanent magnets to electrodynamic sensor and the results of simulation and laboratory tests of electrical machine excited by permanent, in which an increased level of vibration was caused by unbalance.

Słowa kluczowe: generator, magnesy trwałe, diagnostyka, drgania, izolacja główna, izolacja zwojowa
Keywords: generator, permanent magnets, diagnostics, vibration, main insulation, turn – to – turn insulation

1. Wstęp

Rzeczywistość oraz materiałoznawstwa w ostatnich latach spowodowały zwiększenie zastosowań magnesów trwałych w napędach związanych z energetyką odnawialną, m.in. elektrowniach wodnych [12], wiatrowych [8], [13], a także napędach trakcyjnych (elektromobilność, Rys. 1) [9-11].

Zwiększenie zastosowań magnesów trwałych w budowie maszyn elektrycznych związany jest z poprawą ich parametrów: zwiększeniem przeciążalności momentem, polepszeniem właściwości regulacyjnych, zwiększeniem sprawności i gęstości mocy, uproszczeniem konstrukcji (Tab. 1).

Obecnie, jak większość napędów elektrycznych, również te z magnesami trwałymi wymagają okresowej diagnostyki. Badania okresowe mają na celu zapobieganie poważnym awariom, którym najczęściej towarzyszą wysokie koszty związane nie tylko z remontem maszyny, ale również z okresem przestoju.

Najczęściej w maszynach elektrycznych występuje problem z degradacją izolacji uzwojeń, bądź z uszkodzeniem łożysk, któremu towarzyszy wzrost poziomu wibracji.



Rys. 1. Fiat Panda z silnikiem wyprodukowanym przez KOMEL – projekt badawczo-rozwojowy nr NR01-0084-10[9-11]

Tabela 1. Zestawienie parametrów maszyn elektrycznych

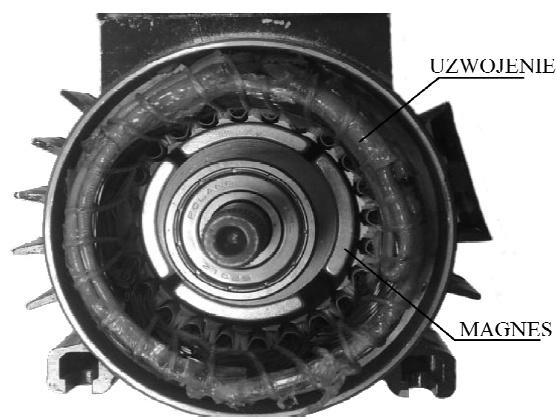
Rodzaj silnika elektrycznego	h	P	n	η	m
		kW	1/min	%	kg
Silnik asynchroniczny	200	30.0	1472	92.5	265
Silnik prądu stałego	160	34.7	1560	88.5	247
Silnik z magnesami trwałymi	160	31.2	1500	91.8	110

2. Diagnostyka drganiowa

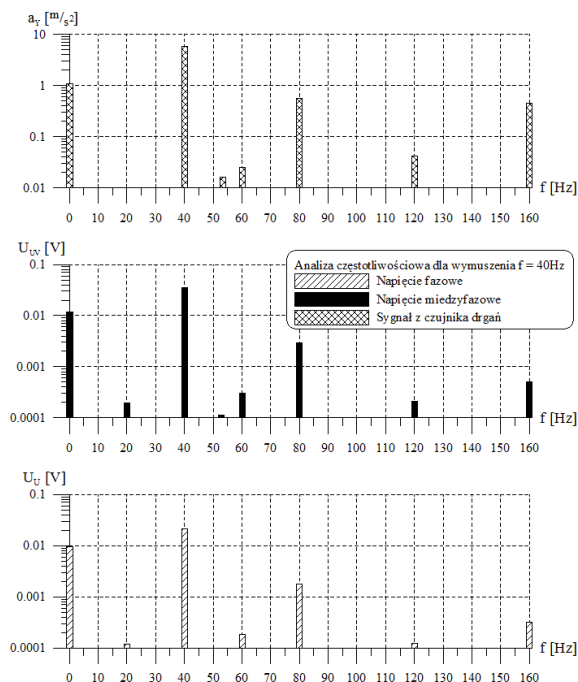
Zadaniem diagnostyki drganiowej jest uzyskanie swoistej bazy danych dotyczących stopnia zużycia danych podzespołów. W zależności od celu pomiaru oraz typów badanych maszyn, podstawowe znaczenie mają przebiegi szybkozmienne: przemieszczenia, prędkości lub przyspieszeń drgań. Dla ogólnej oceny maszyny istotna jest wartość RMS prędkości drgań, która odzwierciedla energię niszczącą. Chcąc natomiast poznać ich przyczynę, konieczne jest przeprowadzenie analizy częstotliwościowej drgań. Pozwala to na rozłożenie sygnału badanego na składowe. Znając parametry ruchowe maszyny oraz jej konstrukcję można poszczególnym składowym widma przypisać konkretne elementy lub stany pracy maszyny. Diagnostyka drganiowa większości maszyn elektrycznych opiera się głównie na pomiarach, przy wykorzystaniu zewnętrznych czujników pomiarowych oraz dedykowanej do tego celu kosztownej i skomplikowanej aparatury [14-16]. W rozwiązaniach tych trzeba zwracać uwagę na możliwości montażu czujnika do maszyny, co często stwarza problemy, gdyż maszyna fabrycznie jest rzadko do tego celu przystosowana. Sposób zamontowania wpływa na zakres przenoszonych częstotliwości sygnału badanego. Należy również zwracać szczególną uwagę na separację układu pomiarowego od wszelkiego rodzaju zakłóceń, które mogą powodować nieprawidłowe wskazania aparatury pomiarowej. Zaletą opisywanej metody wykrywania wibracji wzbudzanych przyczynami mechanicznymi w maszynach elektrycznych z magnesami trwałymi jest to, że układ pomiarowy nie wymaga stosowania czujników do pomiaru drgań. Uzwojenie twornika oraz obwód wzbudzenia pełnią bowiem także funkcję czujnika pomiarowego drgań. Czujniki do pomiaru drgań są stosowane w tym przypadku jednorazowo do skalowania pomiarów dla danego typu maszyny. Pomiar drgań tą metodą mogą być wykonywane on-line w czasie normalnej eksplo-

atacji maszyny [4]-[7]. Maszyna z magnesami trwałymi (Rys. 2) jest bardzo podobna do elektrodynamicznego czujnika drgań ze względu na:

- podobną budowę – magnesy trwałe oraz uzwojenie, czyli cewka. Pod wpływem wibracji generuje się SEM, a więc sygnał który można wykorzystać do analizy drgań,
- większa liczba zwojów oraz par biegunów indukują większy sygnał pomiarowy, a więc czułość jest zależna od liczby zwojów uzwojenia – analogicznie jak w czujniku elektrodynamicznym,
- nie potrzebuje zewnętrznego źródła zasilania.



Rys. 2. Przykład maszyny z magnesami trwałymi



Rys. 3. Analiza częstotliwościowa maszyny z magnesami trwałymi – wyniki badań statycznych

Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe wyniki badań jednej z maszyn z magnesami trwałymi. Wykres przedstawia porównanie analizy częstotliwościowej z czujnika drgań oraz sygnałów własnych maszyny w stanie statycznym. Maszyna została przebadana na stole wibracyjnym, przy zewnętrznie wymuszonych wibracjach. Można zaobserwować, iż analiza częstotliwościowa sygnałów własnych (w tym przypadku napięć – zarówno fazowego, jak również międzyfazowego), w dużej mierze odpowiada analizie częstotliwościowej sygnału pochodzącego z czujnika przyspieszenia drgań. Świadczy to o tym, że maszyna z magnesami trwałymi może zostać użyta do diagnostyki drganiowej poprzez analizę częstotliwościową jej sygnałów własnych.

3. Metoda diagnostyki izolacji głównej

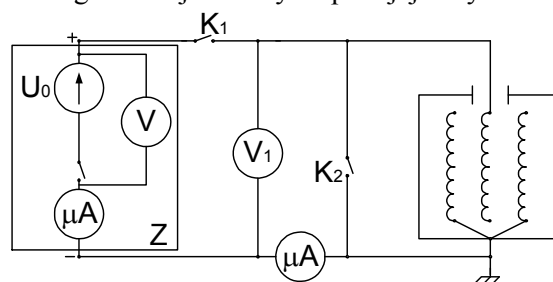
Stosowana przez autorów metoda diagnostyczna prądu stałego dla izolacji głównej to jedna z najprostszych metod pomiarowych [1]. Zawiera ona trzy testy:

- wyznaczenie charakterystyki $R_{60} = f(U)$, o ile jest to możliwe w przedziale napięcia od zera do $2U_N$,
- charakterystyka prądu upływu i_p
- charakterystyka odbudowy napięcia $U_{od}(t)$.

Tabela 2. Kryteria oceny

Parametr układu izolacyjnego	Ocena stanu technicznego izolacji						
	5	4	3	2	1	0	
Napięcie przebiecia U_p/U_N	>3	>3	>2	~1,5	~1	~1	
Rezystancja R_{60N}/U_N [kΩ/V]	$U_N=6kV$	>50	>20	>10	>10	>10	<3
	$U_N<1kV$	>50	>20	>10	>3	>1	<1
Czas zwarcia t_z [s]	$U_N=6kV$	30	30	30	1	1	0
	$U_N<6kV$	10	10	10	1	0	0
Maksymalna wartość odbudowanego napięcia U_{odmax}/U_0	>0,1	≥0,1	≥0,05	≥0,01	0	0	
Czas odbudowy napięcia t_{od} [s]	$U_N=6kV$	>240	>120	>30	~10	0	0
	$U_N<1kV$	>120	>60	>15	~5	0	0
Wahania prądu upływu przy U_N $\frac{i_{p60 max} - i_{p60 min}}{i_{p60 \text{ \textit{sr}}}}$	<0,5	<1	>1	>1	>2	0	
Współczynnik absorpcji i_{p1}/i_{p60}	$U_N=6kV$	>1,5	>1,2	>1	1	1	1
	$U_N<1kV$	>1,3	>1,1	>1	1	1	1

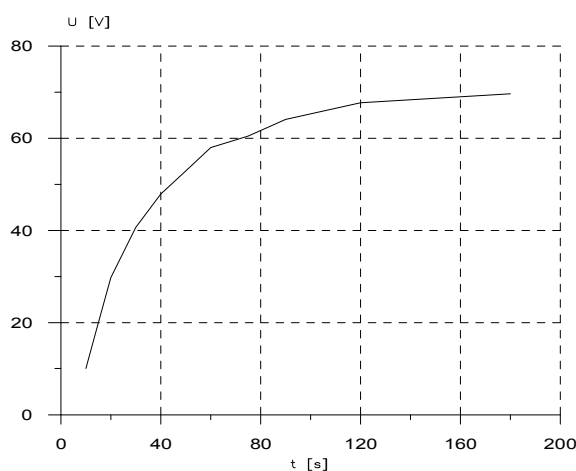
Pierwsze dwie próby są powszechnie stosowane w badaniach okresowych izolacji, gdyż są zalecane w instrukcjach eksploatacji maszyn elektrycznych. Jednak zakres tych prób ogranicza się zwykle do jednej wartości napięcia 2500V, 1000V, 500V i coraz częściej 5000V. W polecanym programie badań diagnostycznych rozszerza się zakres tych prób na wyznaczenie charakterystyki $R_{60} = f(U)$, o ile jest to możliwe do $2U_N$ i wyznaczenie $i_p = f(t)$ przy U_N . Badanie odbudowy napięcia (próba trzecia) jest próbą najważniejszą dla diagnostyki stanu technicznego izolacji i oceny stopnia jej zużycia.



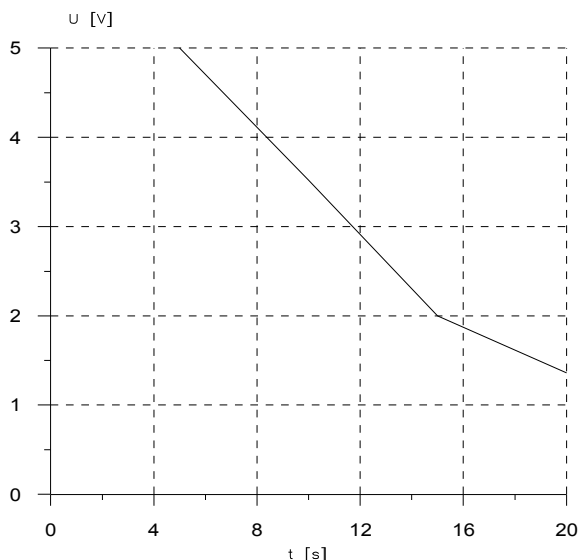
Rys. 4. Schemat układu do diagnostyki izolacji głównej

Badania przeprowadza się w układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 4. W tabeli 2 scharakteryzowano ocenę punktową stopnia degradacji izolacji w oparciu o wyznaczone parametry kryterialne:

- 5 – izolacja bez zastrzeżeń,
- 4 – dobra izolacja,
- 3 – satysfakcjonujący stan izolacji,
- 2 – nie satysfakcjonujący stan izolacji,
- 1 – izolacja zużyta,
- 0 – izolacja zdegradowana.



Rys. 5. Odbudowa napięcia dla maszyny z dobrą izolacją główną

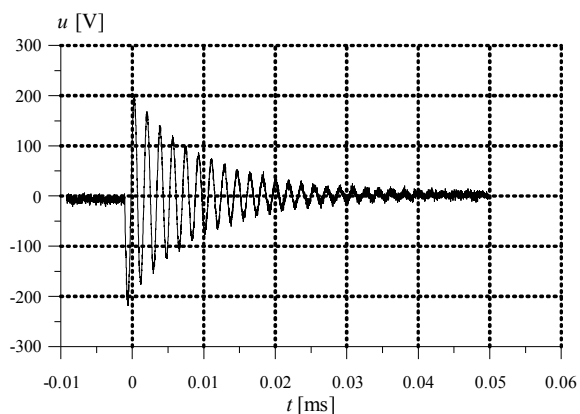


Rys. 6. Odbudowa napięcia dla maszyny z złą izolacją główną

Na rysunku 5 oraz rysunku 6 przedstawiono przykład charakterystyk odbudowy napięcia dla maszyn z dobrą oraz zdegradowaną izolacją główną.

4. Metoda diagnostyki izolacji zwojowej

Diagnozowanie stanu izolacji zwojowej z wykorzystaniem metody tzw. fali rozmytej polega na wygenerowaniu napięcia w badanym uzwojeniu w chwili wyłączania prądu stałego [2]. Napięcie to rozkłada się równomiernie na poszczególnych zewojach. Częstotliwość generowanego napięcia zależy wyłącznie od parametrów izolacji zwojowej uzwojenia.



Rys. 7. Przebieg napięcia maszyny elektrycznej z dobrą izolacją zwojową

Proponowana metodyka realizacji badań polega na zasileniu badanego obwodu prądem stałym o wartości z przedziału 5 - 10% wartości prądu znamionowego badanej maszyny (w miarę mo-

żliwości) pomiary uzwojeń każdej fazy przeprowadzamy oddzielnie, w przypadku braku takiej możliwości pomiary można wykonać na uzwojeniach połączonych ze sobą. Ocenę stanu technicznego uzwojenia przeprowadza się w oparciu o następujące wielkości:

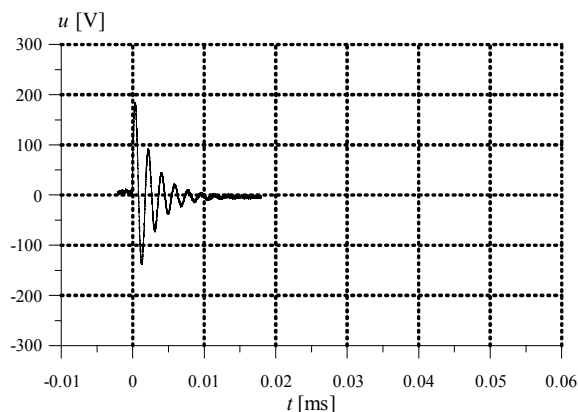
- częstotliwość napięcia indukowanego,
- kształt napięcia indukowanego,
- tłumienie napięcia indukowanego Λ (1).

$$\Lambda = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}} \quad (1)$$

gdzie:

A_n – amplituda n okresu,

A_{n+1} – amplituda n + 1 okresu



Rys. 8. Przebieg napięcia maszyny elektrycznej ze zdegradowaną izolacją zwojową

5. Badania termowizyjne

Termowizja bazuje na detekcji i rejestracji promieniowania podczerwonego emitowanego przez obiekty, których temperatura jest wyższa od zera bezwzględnego i przekształceniu tego promieniowania na światło widzialne. Otrzymany obraz termalny jest odwzorowaniem pola temperaturowego na powierzchni badanego obiektu. Jest to możliwe dzięki temu, że moc promieniowania ciał jest zależna od ich własności promiennych. Badania takie możemy wykonywać za pomocą kamer termowizyjnych. Współczesna termowizja umożliwia cyfrową rejestrację rozkładu temperatur badanego obiektu. Tak powstała "mapa temperatur" jest następnie interpretowana graficznie – każdej temperaturze przypisywany jest inny kolor, dzięki czemu w wizjerze widziany jest termiczny obraz obiektu. Ponieważ zapisywane dane w praktyce są mapą temperatur obiektu, ten sam obiekt, w zależności od przyjętej skali barw oraz jej relacji do skali temperatur może

wyglądać różnie. System termowizyjny jest, więc rodzajem niezwyklego termometru, który pozwala mierzyć temperaturę na odległość w wielu miejscach jednocześnie.

Diagnostyka termograficzna to efektywna i nieinwazyjna metoda diagnostyczna oparta o pomiary termowizyjne, gdzie za pomocą kamery uzyskuje się obraz pola temperaturowego badanego obiektu oraz zdalny pomiar temperatury z rozdzielczością zależną od rodzaju przetwornika, w jaki wyposażono kamerę. Podstawową zaletą tej metody jest fakt, że pomiary dokonywane są podczas normalnej pracy [3].

Aby dokonać dokładnego pomiaru rozkładu temperatur maszyny elektrycznej, niezbędne jest skompensowanie wpływu różnych źródeł promieniowania. Jest to dokonywane automatycznie przez kamerę, po wprowadzeniu do niej opisanych parametrów obiektu:

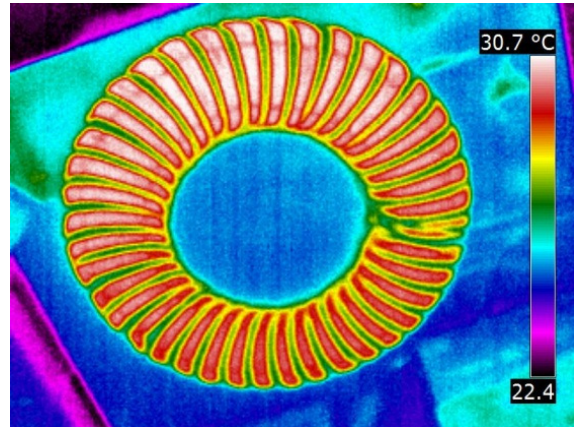
- temperatura otoczenia,
- odległość między obiektem, a kamerą,
- temperatura odbita pozorną,
- wilgotność powietrza,
- współczynnik emisyjności.



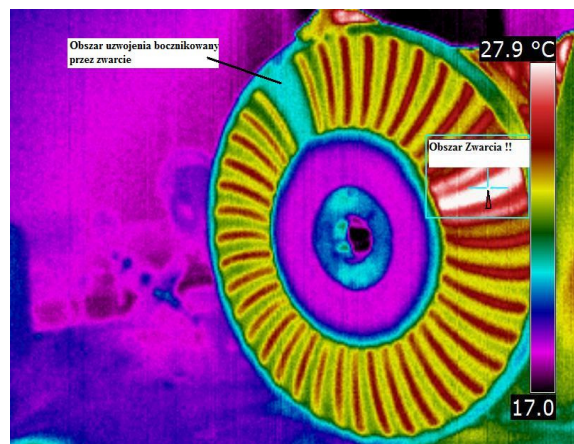
Rys. 9. Kamera termowizyjna

Pomiary przy użyciu kamery termowizyjnej (Rys.9.) charakteryzują się wysoką skutecznością i mogą być wykorzystywane w wielu różnych typach badań maszyn elektrycznych takich jak:

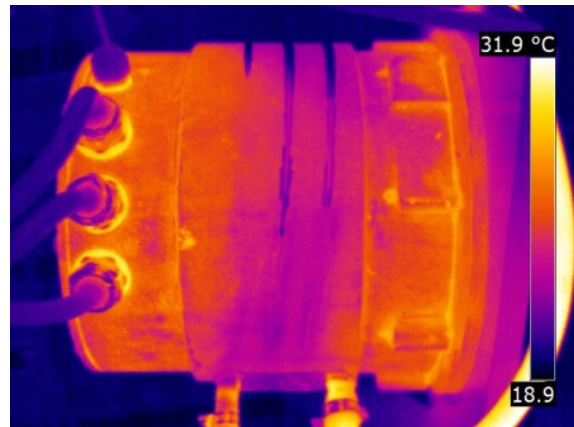
- sprawdzenie ciągłości uzwojenia (Rys. 10),
- wykrywanie zwarć zwojowych (Rys. 11),
- sprawdzenie kanałów chłodzących (Rys. 12),
- sprawdzenie nagrzewania się łożysk (Rys. 13).



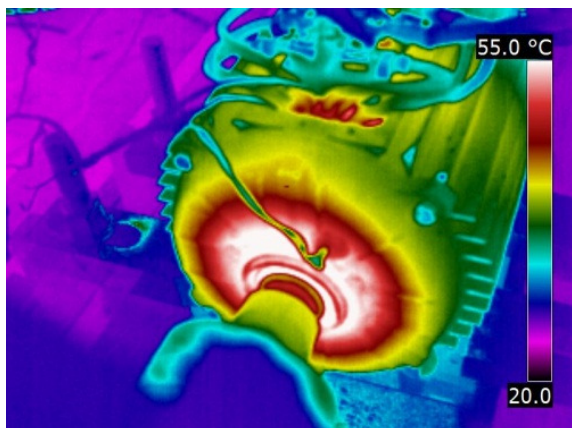
Rys. 10. Sprawdzenie ciągłości uzwojenia



Rys. 11. Wykrywanie zwarć zwojowych



Rys. 12. Test kanałów chłodzących



Rys. 13. Nagrzewanie się łożysk

6. Podsumowanie

W pracy autorzy przedstawili wybrane metody diagnostyki maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi: diagnostyka izolacji głównej i zwojowej, diagnostyka drganiowa oraz badania termowizyjne.

Metody te są powszechnie używane do wykrywania typowych uszkodzeń w maszynach elektrycznych przez pracowników Laboratorium Maszyn Elektrycznych Instytutu KOMEL.

Metoda diagnostyki izolacji zwojowej jest prosta i bardzo efektywna. Kryteria oceny są przejrzyste i proste do sprawdzenia poprzez pomiary.

Metoda diagnostyki izolacji zwojowej w oparciu o analizę rozmytej fali napięciowej bazuje na porównaniu parametrów zdegradowanego uzwojenia (Rys.8) z uzwojeniem zdrowym (Rys.7). Ta metoda również nie sprawia problemów wprawnemu diagnoście.

Termowizja jest bardzo efektywną i nieinwazyjną metodą diagnostyczną. Kamera termowizyjna jest pewnego rodzaju termometrem, który na odległość potrafi określić rozkład temperatury danego obiektu w kilku miejscach jednocześnie. Może być wykorzystana w szeregu testach, m.in. do sprawdzania uzwojeń, kanałów chłodzących oraz łożysk.

Autorzy również przedstawili pokrótce nową drganiową metodę diagnostyczną, która nie wymaga kosztownej aparatury oraz czujników pomiarowych. Bazuje ona na analizie częstotliwościowej sygnałów własnych maszyny (prąd, napięcie). Metoda pozwala również na diagnostykę on – line, przy użyciu dodatkowego oprzyrządowania pozwalającego na analizę czę-

stotliwościową sygnału pomiarowego eksploatowanego napędu.

Jest to podejście innowacyjne i niestandardowe. Przedstawiona metoda, zdaniem autorów, którzy na co dzień zajmują się badaniem maszyn w laboratorium, jak również diagnostyką maszyn elektrycznych eksploatowanych w przemyśle, znacznie upraszcza diagnostykę drganiową w maszynach z magnesami trwałymi. Diagnosta nie przejmuje się montażem czujników, co w niektórych przypadkach stanowi istotny problem z uwagi na dostęp, np. w pojeździe elektrycznym.

7. Literatura

- [1]. Decner A., Polak A., Glinka T.: *Obserwacja procesu starzenia izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych z wykorzystaniem metody napięcia stałego*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, 2007.
- [2]. Decner A., Polak A., Glinka T.: *Ocena stanu technicznego izolacji zwojowej metodą rozmytej fali napięciowej*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, 2012.
- [3]. Barański M., Polak A.: *Termograficzne badania maszyn elektrycznych – na co należy zwrócić uwagę*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, 2007.
- [4]. Barański M., Glinka T.: *Sposób diagnozowania drgań wzbudzanych niewyważą w maszynach elektrycznych z magnesami trwałymi*, Zgłoszenie patentowe P.405669.
- [5]. Barański M.: *Nowa metoda wykrywania drgań spowodowanych niewyważą – diagnostyka generatorów z magnesami trwałymi*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, 2014.
- [6]. Barański M.: *Diagnostyka drganiowa generatorów wzbudzanych magnesami trwałymi – nowa metoda wykrywania drgań spowodowanych niewyważeniem*, Przegląd Elektrotechniczny, 6/2014.
- [7]. Barański M., Decner A., Polak A.: *Selected diagnostic methods of electrical machines operating in industrial conditions*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 5/2014.
- [8]. Rossa R., Białas A.: *Prądnica synchroniczna z magnesami trwałymi o wirniku zewnętrznym do przydomowych elektrowni wiatrowych*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, 89/2011.
- [9]. Rossa R.: *Badania eksploatacyjne samochodu osobowego zelektryfikowanego zestawem „E-KIT”*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, 2/2014.
- [10]. Rossa R.: *Zaawansowane rozwiązania techniczne w napędzie elektrycznym „E-KIT” dla miejskiego samochodu osobowego*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, 2/2014.
- [11]. Rossa R., Będkowski B., Białas A., Radwański W.: *Koncepcja napędu elektrycznego „E-KIT”*

dla miejskich samochodów osobowych, *Maszyny Elektryczne: Zeszyty Problemowe*, 4/2014.

[12]. Pistelok P., Kądziołka T.: *Nowa seria wysoko-sprawnych dwubiegunowych generatorów synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi*, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, 100/2013.

[13]. Wolnik T., Białas A.: *Wolnoobrotowy, bez-rdzeniowy generator tarczowy o mocy 2 kW*, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, 89/2011.

[14]. Szymaniec S.: *Pomiary częstotliwości drgań własnych i rezonansowych maszyn i elektrycznych w warunkach ich eksploatacji*, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, 3/2012.

[15]. Szymaniec S.: *Ścieżki pomiarowe do pomiarów drgań względnych w maszynach elektrycznych*, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, 81/2009.

[16]. Szymaniec S.: *Pomiary drgań względnych w silnikach elektrycznych*, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, 82/2009.

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”.