

Michał Rad\*, Witold Rams\*, Wojciech Kandora\*\*

\* AGH, Kraków, \*\* TurboCare, Lubliniec

## WYKRYWANIE DEFECTÓW RDZENI MASZYN PRĄDU PRZEMIENNEGO METODĄ SKANOWANIA MAGNETYCZNEGO

### FAULT DETECTION IN THE STATOR CORE OF AC ELECTRIC MACHINES BY MAGNETIC SCANNING METHOD

**Streszczenie:** Tradycyjna metoda wykrywania zwarców blach w stojanach maszyn elektrycznych prądu przemiennego, polega na wzbudzeniu kołowego pola magnetycznego w żelazie i obserwacji rozkładu temperatur na wewnętrznej powierzchni żelaza. Metoda ta posiada jednakże istotne wady: duża wartość prądu wzbudzającego i potrzebna moc źródła, kilkugodzinny czas potrzebny do otrzymania wiarygodnych wyników. Stosowane są więc inne metody oparte na pomiarze pola magnetycznego przy powierzchni żelaza. Typowym urządzeniem jest system ELCID. Dla każdej pary zębów otrzymuje się jedną wartość w danym miejscu na długości stojana. Wymaganiem praktyki kontroli jest bardziej precyzyjne określenie miejsca zwarcia blach, porównywalne z metoda termowizyjną. Opracowano inny sposób pomiaru pola magnetycznego przy powierzchni żelaza, czujnikami elektronicznymi. Wykorzystywana głowica ma rozdzielczość przestrzenną wyników około 10 mm. Pomiary i niezbędne obliczenia oraz wizualizacja wyników realizowane są przez dedykowany program komputerowy.

**Abstract:** The classic method of detecting faults in metal stators of electrical machines is based on the excitation of a circular magnetic field in the iron, and the observation of the temperature distribution on the inner surface of the iron. This method, however, have significant drawbacks: high excitation current requiring high-power sources, a few hours the time needed to obtain reliable results. There are other methods based on the measurement of the magnetic field at the surface of the iron. A typical device is ELCID system. For each pair of teeth is obtained one value in the position, on the length of the stator. In practice, a more precise definition of the fault place is needed, comparable to the infrared method. Another method for measuring the magnetic field at the surface of iron by the electronic sensors have been developed. The applied head has a spatial resolution of about 10 mm. Measurements and necessary calculations and visualization of the results are carried out by a dedicated computer program.

**Słowa kluczowe:** maszyny elektryczne, izolacja blach, badania diagnostyczne prądem zmiennym

**Keywords:** electrical machines, stator core insulation, AC diagnostic tests

#### 1. Wstęp

Tradycyjna metoda wykrywania zwarców blach w stojanach maszyn elektrycznych prądu przemiennego, polega na wzbudzeniu kołowego pola magnetycznego prądem przemiennym maszyny, a następnie obserwacji rozkładu temperatur na wewnętrznej powierzchni żelaza, dotykowo lub za pomocą kamery termowizyjnej. Jej wadami są: duża wartość prądu wzbudzającego, potrzebna duża moc źródła, kilkugodzinny czas potrzebny do otrzymania wiarygodnych wyników oraz brak możliwości szybkiego lokalnego sprawdzenia. Stosowane są też inne metody, oparte na pomiarze pola magnetycznego. Wzbudzeniem jest też prąd wewnątrz otworu stojana, lecz o znacznie mniejszej wartości. Typowym urządzeniem jest system ELCID, w którym mierzona wielkością jest spadek napięcia magnetycznego pomiędzy sąsiednimi zębami

stojana. Stosowana jest tam jedna cewka powietrzna, aby łatwo było dostosowywać ją do rozpiętości zębów. Dla każdej pary zębów otrzymuje się więc jedną wartość w danym miejscu na długości stojana. Wymaganiem praktyki kontroli jest jednak bardziej precyzyjne określenie miejsca zwarcia blach na zębie, porównywalne z metoda termowizyjną.

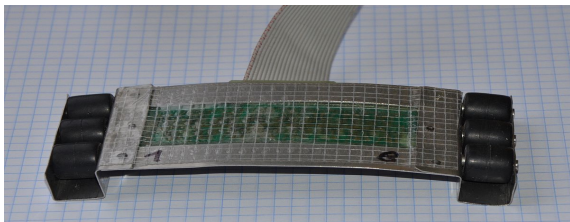
#### 2. Metoda pomiaru

Dla spełnienia tych wymagań, opracowano inny sposób pomiaru pola magnetycznego przy powierzchni żelaza. Wzbudzenie pola magnetycznego realizowane jest też za pomocą prądu płynącego w przewodzie umieszczonym w otworze stojana. Wielkością mierzona jest natomiast lokalne natężenie pola magnetycznego przy powierzchni wewnętrznej zębów z użyciem wielokanałowej głowicy elektronicznej.

Umieszczone w niej równolegle czujniki pola pozwalają na uzyskanie obrazu rozkładu przestrzennego pola nad zębem. Wykorzystywana głowica wyposażona może być przykładowo w osiem niezależnych czujników i daje rozdzielczość przestrzenną pomiarów około 10 mm, już zadowalającą w praktyce. W każdym miejscu rejestrowane są przebiegi czasowe pola i prądu, następnie odpowiednio przeliczane i w efekcie uzyskiwane są wartości wskaźnika specyficznego dla istnienia zwarć blach. Jest on mało czuły na inne czynniki mogące zakłócać pomiary. Oddzielnie używany jest niewielki pojedynczy czujnik, do lokalnego sprawdzania lub kontroli po naprawie. Niezbędne pomiary i obliczenia oraz wizualizacja wyników realizowane są przez dedykowany program komputerowy. Artykuł, prócz prezentacji samego rozwiązania, zawiera wyniki pomiarów dokonanych w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych.

### 3. Układ pomiarowy

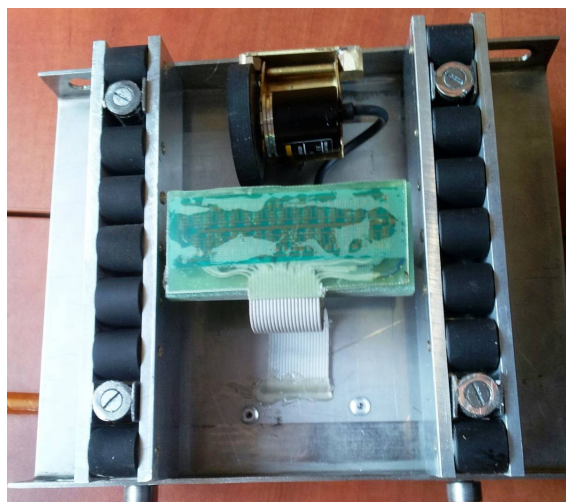
W stosowanych dotychczas układach pomiarowych, jako czujnika pola używa się cewek magnetycznych o różnych kształtach. Są one ze swej natury dość duże i mało elastyczne. Zwykle, tak jak w ELCID, jest to jedna cewka powietrzna. Typowe przetworniki pomiarowe A/C dysponują natomiast zwykle szesnastoma kanałami. Celowym jest więc zastosowanie też wielokanałowych czujników pola. Taką możliwość dają obecnie elektroniczne czujniki natężenia pola magnetycznego; tanie i o niewielkich rozmiarach. Wykorzystując je zbudowano głowicę pomiarową, której podstawową część przedstawia rysunek 1. Skala według kratek na papierze.



Rys. 1. Ośmiokanałowa cienka głowica pomiarowa

Rolki boczne ułatwiają przesuwanie, a elastyczna konstrukcja dopasowanie do krzywizny otworu stojana, głównie silników indukcyjnych. Grubość głowicy można zmniejszyć do 10 mm. Do kontroli stojanów turbogeneratorów przewidziana jest głowica z rysunku 2. Tutaj rolki pro-

wadzące są przestawne. Czujniki pomiarowe obejmują jeden lub dwa zęby. Płytkę z czujnikami nie musi dolegać do żelaza; wskazany jest nawet kilkumilimetrowy odstęp. Magnesy na bokach zapewniają utrzymanie głowicy przy żelazie, nawet w górnym położeniu, co ilustruje rysunek 3. Z przodu jest przymocowane kółko z impulsatorem do pomiaru drogi. Wartości natężenia pola są równocześnie odczytywane z wszystkich czujników, wraz z chwilową wartością prądu wzbudzającego. Prąd wzbudzający pole ma częstotliwość sieciową i dlatego nie trudno go uzyskać.



Rys. 2. Ośmiokanałowa głowica pomiarowa



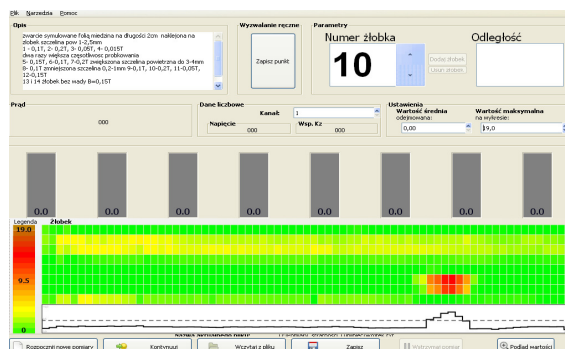
Rys. 3. Głowica pomiarowa z uchwytem magnetycznym

Ze zmierzonych przebiegów wyliczane są wartości wskaźnika zwarcia blach, wedle metody przedstawionej w pracy [1] dla miejsca położenia każdego czujnika w danej chwili czasowej, czyli na danej długości stojana. W konsekwencji, po przejechaniu przez całą długość maszyny, otrzymuje się dwuwymiarową mapę stanu żelaza. Za jednym przejazdem głowicy kontrolowany jest pas o szerokości około 10 cm.

Realnie istnieje możliwość powiększenia ilości elementarnych czujników do piętnastu, lecz cała głowica staje się wtedy mniej poręczna. Z przeprowadzonych doświadczeń wynika, że skuteczną kontrolę można realizować już przy indukcji w żelazie w zakresie (100-200) mT. Nie musi być ona stabilizowana. Można jej przybliżony poziom kontrolować dodatkowym uzwojeniem nawiniętym dookoła żelaza lub przez obliczeniowe szacowanie średniego natężenia pola w powietrzu przy żelazie, z wymiarów stojana i natężenia prądu wzbudzającego. Typowa wartość to 40 A/m.

#### 4. Program komputerowy

Do obsługi pomiarów, wizualizacji i zapisu wyników został opracowany przez autorów specjalny program komputerowy. Główne okno programu pokazane jest na rysunku 4. Program na bieżąco oblicza oraz wyświetla wartości współczynnika stratności  $K_z$  dla każdego z czujników. Możliwy jest również podgląd sygnałów każdego z kanałów jak również wizualizacja wartości współczynnika  $K_z$  dodatkowego kanału do dokładnej lokalizacji miejsca uszkodzenia.



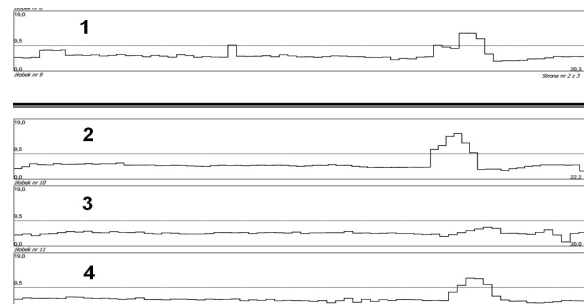
Rys. 4. Okno główne ekranu pomiarowego

Podczas pomiaru na bieżąco pokazywane są wyniki w postaci mapy kolorów, której skalę można płynnie i w dowolnym momencie dostosować. Obraz ten jest w formie dość podobny do wyników uzyskanych metodą termowizyjną. Kolejne zmierzone wartości, dodawane są ręcznie lub też pomiar wyzwalany jest automatycznie dzięki zastosowaniu enkodera na rolce w głowicy. W przypadku pracy z głowicą pomiarową wyposażoną w enkoder (rysunek 2.) dodatkowo wykreślany jest wykres wartości maksymalnej współczynnika zwarcia na długości badanego zęba stojana, co pokazano na rysunku 4.

Ponieważ cały system powinien już prawidłowo wykrywać obszary o niewiele podniesionej stratności – w odniesieniu do termowizji jest to rząd dwóch i więcej °C – dlatego program ma możliwość dokładnej kalibracji, którą można wykonać szybko przed rozpoczęciem każdego pomiarów. Oprócz pokazywania wyników na bieżąco program daje możliwość wydrukowania raportów w postaci wykresów wartości maksymalnej współczynnika zwarcia na całej długości badanych zębów stojana. Ponadto, wyniki zapisywane przez program można w razie potrzeby zaimportować do innych programów, takich jak arkusze kalkulacyjne. Daje to możliwość praktycznie dowolnej dalszej obróbki i wizualizacji. Ponieważ program tworzony jest bezpośrednio przez autorów, istnieje możliwość doskonalenia go na bieżąco i dostosowywania do pojawiających się potrzeb, zgodnie ze zdobywanym doświadczeniem.

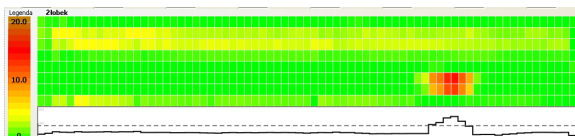
#### 5. Pomiary przemysłowe

Wykonano pomiary symulacyjne na stojanie generatora ASEA GTP 60/150 o mocy  $P=11\text{MW}$ . Pakiet stojana generatora nie wykazywał żadnych uszkodzonych miejsc podczas pomiarów termowizyjnych, kiedy to indukcja w rdzeniu wynosiła  $B=1\text{T}$ . Zasympulowano uszkodzenie naklejając na wewnętrzną powierzchnię rdzenia folię miedzianą o powierzchni około  $1\text{cm}^2$ . Wykonano skanowanie magnetyczne w obszarze symulowanego uszkodzenia przy różnych wartościach indukcji, co przedstawiono na rysunku 5. Poniższe wykresy przedstawiają wartości maksymalne współczynnika zwarcia  $K_z$  na długości 30cm zęba z symulowaną wadą przy różnych wartościach indukcji rdzenia. Indukcja podczas testów wynosiła odpowiednio  $B_1=0,1\text{T}$ ,  $B_2=0,2\text{T}$ ,  $B_3=0,05\text{T}$ ,  $B_4=0,15\text{T}$ . Indeksy odpowiadają opisom na przebiegach z rysunku 5.



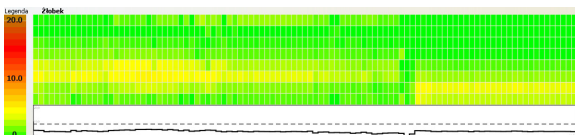
Rys. 5. Wyniki skanowania magnetycznego zęba z symulowaną wadą przy różnych wartościach indukcji magnetycznej w rdzeniu

Mapę skanowania magnetycznego opisywanego zęba na długości 30cm przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Mapa skanowania magnetycznego zębka z symulowaną wadą.

Pomiary zębka bez defektów obwodu magnetycznego nie wykazują podwyższonych wartości współczynnika  $K_z$ , co zobrazowano na rysunku 7.



Rys. 7. Mapa skanowania magnetycznego zębka bez defektów

## 6. Podsumowanie

Wyniki pomiarów symulacyjnych wskazują na dużą skuteczność metody w wykrywaniu uszkodzeń pakietu nawet niewielkich rozmiarów. Małe gabaryty zestawu pomiarowego, duża rozdzielczość przestrzenna oraz brak szczególnych wymagań odnośnie źródła zasilania powodują, że metoda ta może być alternatywą do pomiarów termowizyjnych. Na podstawie pomiarów symulacyjnych wykazano, że minimalna wartość indukcji, która zapewnia dostateczną skuteczność pomiaru wynosi  $B=0,1T$ . Jest to zaledwie 10% wartości indukcji, przy której wykonuje się pomiary termowizyjne. Podczas pomiaru występuje składowa stała wskaźnika  $K_z$ , która wpływa na czułość pomiaru. Właściwe odcięcie składowej stałej w programie komputerowym oraz odpowiednie dobranie wartości granicznych współczynnika  $K_z$  pozwala osiągnąć dużą czułość oraz skuteczność pomiaru. Wynik pomiaru rozkładu przestrzennego pola magnetycznego na powierzchni rdzenia jest w sposób jasny i zrozumiały przedstawiony w programie komputerowym oraz w raporcie z badań. Dalsze kierunki badań będą prowadziły do określenia wartości granicznych współczynnika zwarcia w porównaniu z pomiarami badań termowizyjnych, określenie wpływu indukcji w rdzeniu oraz szczeliny powietrznej na otrzymane wyniki badań.

## 7. Literatura

- [1]. Rams W., Rad M.: *Kontrola jakości blach stojanów i wirników maszyn elektrycznych pod kątem przydatności ich do dalszej eksploatacji* Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 90, 2011.
- [2]. Rams W., Lerch T., Rad M.: *Kontrola stanu izolacji blach maszyn elektrycznych w warunkach przemysłowych* Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 82, 2009.
- [3]. Bytnar A., Krok R.: *Diagnostyka on-line uszkodzeń rdzenia i uzwojenia stojana dużego turbogeneratora* Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 87, 2010.

## Autorzy

dr hab. inż. Witold Rams  
rams@agh.edu.pl

dr inż. Michał Rad  
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza  
www.keiaspe.agh.edu.pl  
rad@agh.edu.pl

dr inż. Wojciech Kandora  
TurboCare Poland S.A.  
www.turbocare.pl  
wojciech.kandora@turbocare.pl

Praca jest realizowana w ramach pracy statutowej AGH, w roku 2012 Nr.11.11.120.873.