

Tomasz Lerch, Michał Rad, Witold Rams
Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

KONTROLA STANU IZOLACJI BLACH MASZYN ELEKTRYCZNYCH W WARUNKACH PRZEMYSŁOWYCH

INDUSTRIAL CONTROL OF ELECTRICAL MACHINES CORE SHEETS INSULATION

Abstract: Core sheets insulations faults of electric machines result in eddy currents appearance. The currents flow is a reason of local temperature increasing which can cause wire and sheets insulation degradation. Visual diagnosis of core sheets insulation during the repair is not reliable. Traditional method of diagnosis, based on flux excitation by high intensity current and temperature increasing observation, is time consuming, not very reliable and inconvenient. Measurement of flux leakage on stator teeth surface is fast and reliable method of core sheets insulation diagnostic. This method doesn't require high intensity excitation current. Equipment offered on the market is very expensive and it is most dedicated to diagnose big synchronous generators. Authors invented, constructed and implemented original device dedicated to measure and diagnose of sheets insulations. Whole the system, with the special dedicated software was tested on special parts in laboratory and also in real industrial conditions. Paper shows principle of operation and results of using the system

1. Wstęp

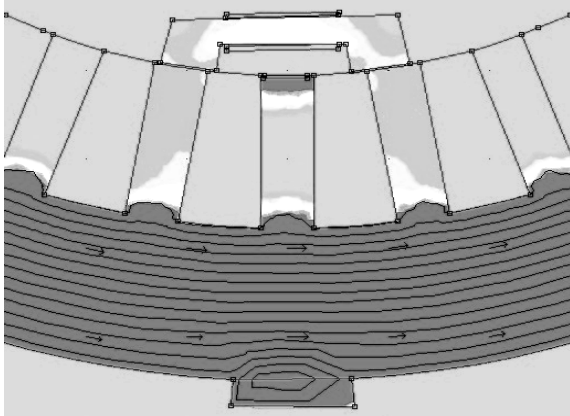
Jednym z uszkodzeń występujących w maszynach elektrycznych prądu zmiennego i stałego są uszkodzenia izolacji blach pakietu stojana lub wirnika. Zwarcia blach obwodu magnetycznego stojana lub wirnika maszyn elektrycznych, poprzeczne do kierunku strumienia magnetycznego, stwarzają możliwość przepływu prądów nieprzewidzianych w konstrukcji maszyny. Z przepływem prądu związany jest lokalny wzrost temperatury, degradujący szybko izolację samych blach lub uzwojeń, co prowadzi do przyspieszonej awarii maszyny. Przypadkowe zwarcia blach mogą powstać na etapie wytwarzania maszyny, ale częściej dochodzi do nich w czasie eksploatacji, np. w konsekwencji otarcia wirnika o stojan. Wizualna ocena, stosowana w czasie remontu maszyny, stopnia zwarcia blach jest mało obiektywna. Tradycyjna metoda, stosowana w warsztatach remontowych do oceny blach stojanów maszyn prądu przemiennego, polega na wzbudzaniu strumienia okrężnego prądem o dużym natężeniu i obserwacji wzrostu temperatury żelaza. Popularność tej metody wynika głównie z tego, że do jej realizacji nie potrzeba specjalistycznego sprzętu pomiarowego, niemniej jednak jest ona czasochłonna, mało obiektywna i kłopotliwa z racji potrzebnego dużego prądu wzbudzającego. Szybko i obiektywnie, przy stosunkowo małym prądzie wzbudzającym, uzyskuje się wyniki stosując pomiar pola magnetycznego rozproszenia na

powierzchni zębów stojana. Metoda ta jest wykorzystywana od kilkunastu lat głównie do badania stojanów dużych generatorów synchronicznych [1, 2, 3, 4]. Różnice w jej aplikacji przez różnych producentów polegają głównie na sposobie pomiaru pola magnetycznego na zębach stojana. Skomercjalizowane urządzenia oferowane są przez kilka firm na świecie [5, 6], ale ich koszt jest stosunkowo wysoki. Brak jest w ofercie urządzeń do badania stojanów maszyn średniej mocy oraz wirników maszyn prądu stałego. Autorzy opracowali, wykonali i wdrożyli do praktyki przemysłowej oryginalne urządzenia przeznaczone do kontroli stanu izolacji blach stojanów maszyn indukcyjnych i wirników maszyn komutatorowych średnich i dużych mocy.

2. Opracowana metoda badania stojanów silników indukcyjnych

W metodzie opracowanej przez autorów okrężne pole magnetyczne w jarzmie wzbudane jest podobnie jak w metodzie warsztatowej poprzez przewód przewinięty przez otwór stojana, przy czym prąd wzbudzający pole ma wartość do 5A i częstotliwość 50Hz. Dzięki temu do wykonania pomiaru nie jest konieczne zasilanie o dużej wydajności prądowej, co jest korzystne w przypadku badań przeprowadzanych w warunkach zakładów remontowych. Czujnik pola wywołanego przepływem prądu w

zwartych blachach został wykonany jako cewka nawinięta na blachowanym rdzeniu o kształcie litery U. Rysunek 1 przedstawia zasadę pomiaru z wykorzystaniem skonstruowanego czujnika indukcyjnego. Kiedy czujnik obejmuje uszkodzony ząb, prąd płynący przez zwarte blachy w górnej części zęba, wywołuje dodatkowy strumień zamykający się przez rdzeń czujnika. Z przeprowadzonych badań wynika, że czujnik o takiej budowie zapewnia większy sygnał i jest bardziej odporny na zakłócenia od zewnętrznych pól niż stosowana w większości komercyjnych rozwiązaniach cewka bezrdzeniowa. Poważną wadą wykrywania zwarcień blach za pomocą takiego czujnika jest to, że wartość mierzonego strumienia jest zależna, oprócz impedancji obwodu zwarcia, także od szczeliny pomiędzy czujnikiem a zębem.



Rys. 1. Pole w rdzeniu i w czujniku indukcyjnym przy zwartych blachach na zębie

Zatem wykorzystanie, jako wskaźnika zwarcia tylko wartości skutecznej sygnału z czujnika indukcyjnego może prowadzić do błędnych wyników, ponieważ jest uzależnione od dokładności przyłożenia czujnika do badanego stojana. Znacznie pewniejszą metodą oceny stanu blach jest wyznaczenie kąta fazowego napięcia z czujnika względem prądu wzbudzenia. Okazuje się jednak, że pomiar kąta fazowego jest utrudniony ze względu na dużą zawartość wyższych harmonicznych w przebiegu napięcia czujnika indukcyjnego. Autorzy zaproponowali więc do oceny stanu blach wykorzystanie wskaźnika ilościowego k_z (1) określonego, jako iloraz uśrednionej wartości iloczynu prądu wzbudzającego i napięcia z czujnika do iloczynu ich wartości skutecznych.

$$k_z = \overline{sr(i_w \cdot u_c)} / (I_{wsk} \cdot U_{csk}) \quad (1)$$

Wskaźnik ten okazał się najbardziej selektywnym sygnałem spośród wszystkich wyżej wy-

mienionych możliwości. Dla ułatwienia realizacji pomiarów i rejestracji wyników został opracowany program w języku C++, który na bieżąco wylicza wartość wskaźnika k_z oraz zapisuje go na życzenie obsługi.

W skład opracowanego i wykonanego przez autorów zestawu do badania stojanów wchodzi miernik MKZ-2, kabel do wzbudzenia pola w stojanie, czujnik indukcyjny oraz przycisk wyzwalania pomiaru. Cały zestaw przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Zestaw do badania stojanów

3. Wyniki badań stojanów

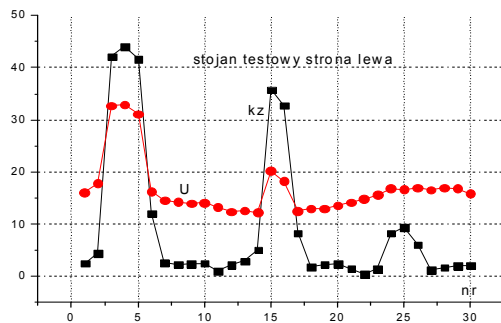
Skonstruowany zestaw do badania stojanów został poddany testom w warunkach laboratoryjnych oraz przemysłowych. W tym celu wykonany został fragment stojana, w którym za pomocą blaszek różnej długości wciskanych między blachy, symulowano zwarcia powierzchni zębów. Stojan testowy z zasymulowanymi trzema uszkodzeniami na różnej długości przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Stojan testowy

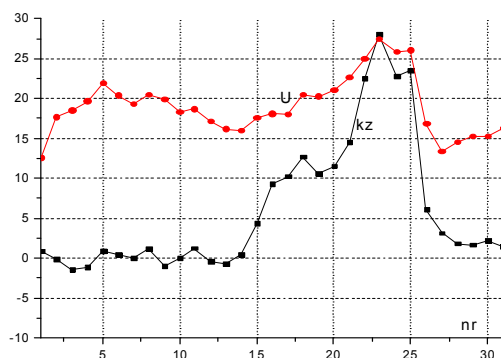
Podczas pomiaru rejestrowana była wartość napięcia z czujnika oraz wskaźnik k_z . Wyniki pomiarów na rysunku 4 przedstawiają przebieg

tych wielkości dla kolejnych trzydziestu zębów testowego stojana. Widać wyraźnie, że zmienność wskaźnika k_z w miejscach uszkodzeń jest wielokrotnie większa od zmian napięcia czujnika. Można także zauważyć, że wartość wskaźnika k_z jest proporcjonalna do długości uszkodzenia. Dla najmniejszego zasymulowanego uszkodzenia zmiana k_z jest około dziesięciokrotna, podczas gdy zmiana napięcia czujnika jest nieznaczna.



Rys. 4. Wyniki pomiarów stojana testowego

W warunkach przemysłowych zestaw pomiarowy został przetestowany w jednym z zakładów remontowych. Obiektem badań był stojan maszyny indukcyjnej w obudowie z zatarciem na powierzchni zębów. Przeprowadzone testy pozwalają stwierdzić, że czytelność uzyskanych wyników nie pogarszała się, pomimo, że kabel wzbudzający pole obejmował stojan razem z litą obudową.



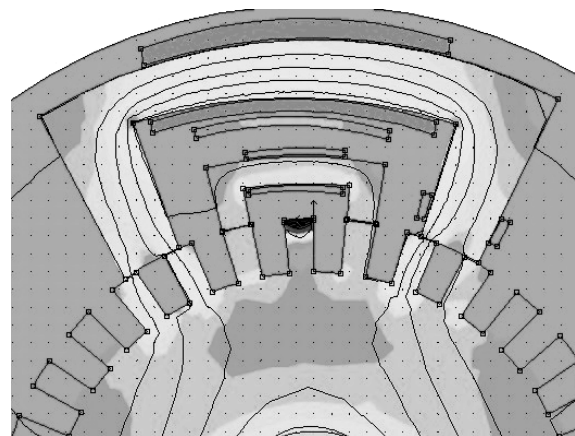
Rys. 5. Wyniki pomiarów w warunkach przemysłowych

Uzyskane wyniki podobnie jak w warunkach laboratoryjnych potwierdzają zdecydowanie większą selektywność wskaźnika k_z od sygnału napięcia czujnika, co widać na rysunku 5. Przebieg wskaźnika k_z pozwala jednoznacznie

stwierdzić, w którym miejscu stojana występuje zwarcie blach.

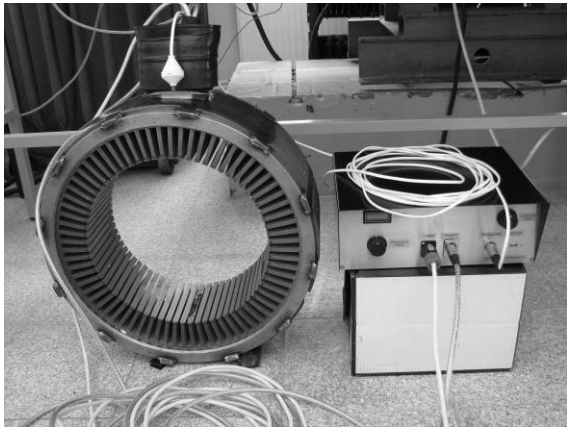
4. Opracowana metoda badania wirników maszyn prądu stałego

Zwarcia blach wirników prądu stałego podobnie jak stojanów maszyn indukcyjnych powodują lokalne nagrzewanie się, co może doprowadzić do uszkodzenia izolacji uzwojenia oraz samych blach. Badanie stanu pakietu blach jest szczególnie ważne podczas remontu maszyny przed ponownym uzwojeniem wirnika. Zastosowanie opisanej wyżej metody diagnostyki stojanów nie jest możliwe ze względu na brak otworu w pakiecie, przez który można by przeprowadzić przewód wzbudzający pole. Do badania wirników maszyn komutatorowych autorzy opracowali metodę pomiarową, w której pole wzbudzane jest w pakiecie blach lokalnie, poprzez przyłożony do powierzchni wirnika wzbudnik. Jeżeli w badanym fragmencie pakietu istnieją zwarcia blach pole indukowane przez prądy płynące w zwartych blachach mierzone jest czujnikiem indukcyjnym. Czujnik umiejscowiony jest pomiędzy biegunami wzbudnika. Metodę wzbudzania pola oraz pomiaru sygnału czujnikiem indukcyjnym obrazuje rysunek 6.



Rys. 6. Metoda wzbudzania pola oraz pomiaru sygnału czujnikiem indukcyjnym

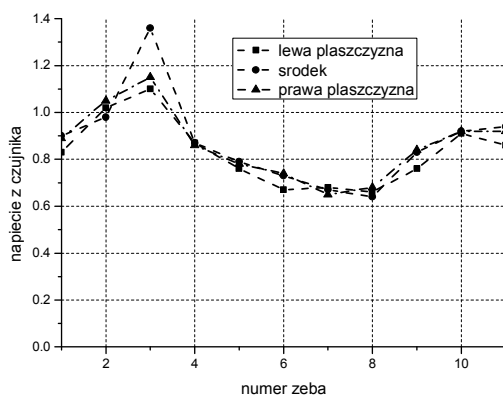
Wzbudnik oraz czujnik indukcyjny współpracują z miernikiem MKZ-2, a sam pomiar przeprowadza się podobnie jak w przypadku badania stojanów. Zestaw skonfigurowany do badania wirników maszyn komutatorowych przedstawia rysunek 7.



Rys. 7. Zestaw do badania wirników

5. Wyniki badań wirników

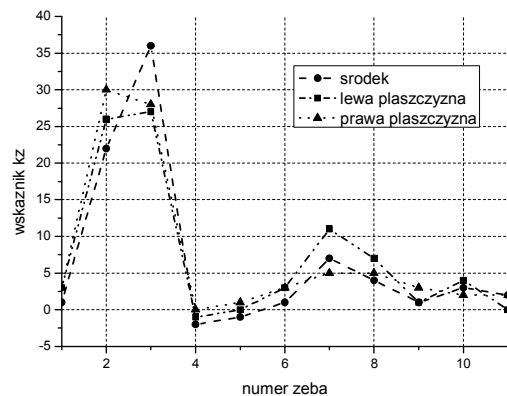
Metoda wykrywania zwarcia blach wirników została przetestowana w warunkach laboratoryjnych, gdzie podobnie jak poprzednio zasymulowano lokalne zwarcia blach. Jako model obwodu magnetycznego wirnika został wykorzystany fragment stojana, na którego zewnętrznej powierzchni wykonano zwarcia blach. Pomiar przeprowadzono dla konkretnych położeń w trzech punktach na długości żelaza w celu dokładniejszej lokalizacji uszkodzenia (na rysunkach nazwano to płaszczyznami pomiaru). Z uwagi na gładką powierzchnię zewnętrzną modelu, określenie zęb wirnika należy tutaj rozumieć umownie, jako przesunięcie czujnika o stałą odległość odpowiadającą szerokości zęba. Podobnie jak poprzednio rejestrowane było napięcie skuteczne z czujnika (Rys. 8) oraz wskaźnik k_z (Rys. 9)



Rys. 8. Wyniki pomiarów napięcia czujnika dla testowego wirnika

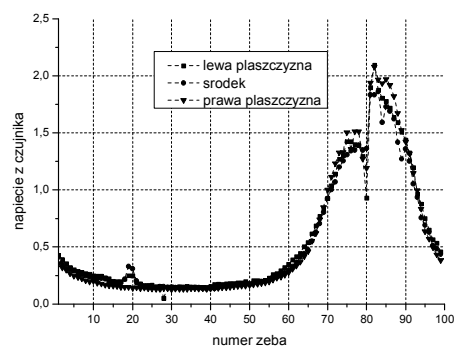
Podobnie jak przy pomiarze stojanów wskaźnik k_z okazał się znacznie bardziej niezawodny w wykrywaniu uszkodzeń izolacji blach. Sygnał napięcia z czujnika tylko w przypadku zwarcia

na zębie nr 3 jednoznacznie wskazał uszkodzenie. Przebieg wskaźnika k_z wykazuje istnienie zwarcia na powierzchni zęba nr 3, 7 i 10. Dzięki pomiarowi w trzech punktach, można stwierdzić, że na zębie nr 3 uszkodzenie izolacji blach jest większe w środkowej jego części, natomiast na zębie nr 7 największa wartość wskaźnika uszkodzenia jest na lewej stronie zęba.



Rys. 9. Wyniki pomiarów wskaźnika k_z dla testowego wirnika

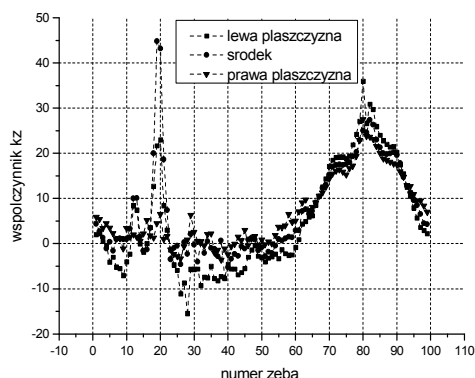
Skonstruowany układ pomiarowy został wykorzystany do badania wirnika maszyny komutatorowej w zakładzie przeprowadzającym remont maszyny po awarii uzwojenia wirnika. Podobnie jak przy badaniach laboratoryjnych każdy ząb wirnika badany był w trzech punktach. Wyniki przeprowadzonych pomiarów przedstawiają rysunki 10 i 11.



Rys. 10. Wyniki pomiarów napięcia czujnika dla remontowanego wirnika

Analiza wyników badania wirnika remontowanej maszyny pozwala stwierdzić, że w trzech punktach (okolice zębów: 12, 20 i 80) istnieją zwarcia blach pakietu. Można więc podejrzewać, że awaria uzwojenia maszyny, która miała miejsce, była spowodowana lokalnym prze-

grzaniem, co doprowadziło do uszkodzenia izolacji uzwojenia.



Rys. 11. Wyniki pomiarów wskaźnika k_z dla remontowanego wirnika

W celu łatwiejszej analizy wyników opracowany program do obsługi pomiarów może, przedstawiać zmierzone wyniki w postaci graficznej mapy uszkodzeń blach pakietu. Przykład takiej mapy przedstawia rysunek 12. Kolor czerwony na ekranie (tu ciemniejsze) sygnalizuje uszkodzenie izolacji blach, kolor zielony (tu jaśniejsze) oznacza brak zwarć.



Rys. 12. Wyniki pomiarów wskaźnika k_z w postaci mapy uszkodzeń

Mapa uszkodzeń blach pakietu stanowi rozwinięcie powierzchni wewnętrznej stojana lub zewnętrznej wirnika. Na osi odciętych znajdują się kolejne punkty pomiarowe na długości zęba a na osi rzędnych kolejne numery zębów. Taki sposób prezentacji wyników pomiaru ułatwia ocenę wzrokową i przyspiesza lokalizację wykrytych uszkodzeń na powierzchni stojana lub wirnika. Rozmiar tej mapy jest zmieniany stosownie do deklaracji użytkownika.

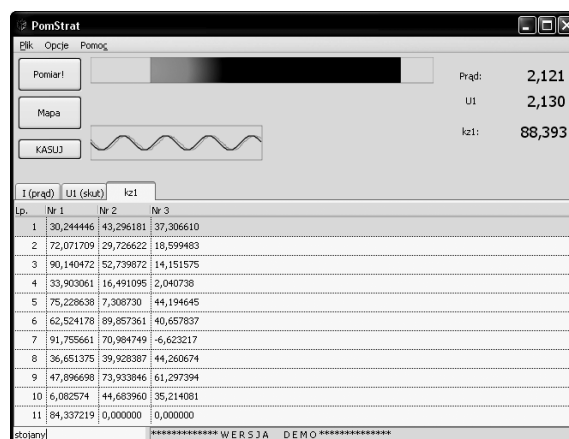
6. Opis elementów układu pomiarowego

Głównym elementem skonstruowanego układu pomiarowego jest miernik MKZ-2. Widok ogólny miernika przedstawia rysunek 13.



Rys. 13. Miernik MKZ-2

Miernik zawiera w sobie źródło prądu wzbudzającego pole z możliwością jego regulacji. Do gniazda prądowego można podłączyć kabel wzbudzający pole w stojanie lub wzbudnik do badania wirników. Wewnątrz miernika znajduje się także układ przetwarzania sygnału z czujnika indukcyjnego wraz z przetwornikiem analogowo-cyfrowym. Miernik MKZ-2 współpracuje z komputerem PC poprzez kabel USB. Obróbka mierzonych sygnałów oraz wyliczanie wskaźnika k_z odbywa się programowo w komputerze. Pomiary obsługiwane są z poziomu komputera PC za pomocą programu PomStrat. Okno główne programu przedstawia rysunek 14.



Rys. 14. Okno główne programu PomStrat

Głównym zadaniem programu jest zapisywanie mierzonych wielkości prądu wzbudzającego, napięcia czujnika indukcyjnego i wartości wskaźnika k_z . Zmierzone wielkości zapisywane są na dysku komputera w postaci pliku tekstowego. Oprócz tego program w oknie głównym na bieżąco wyświetla wartości mierzonych wielkości oraz wizualizuje poziom wskaźnika k_z za pomocą paska. Dodatkową opcją programu jest podgląd przebiegów czasowych prądu wzbudzającego oraz napięcia czujnika, co po-

zwala kontrolować czy mierzone sygnały nie są przesterowane.

Rysunek 15 przedstawia czujnik indukcyjny do badania stojanów maszyn indukcyjnych. Czujnik zabudowany jest w osłonie z blachy ferromagnetycznej, co dodatkowo zmniejsza wpływ zakłóceń na pomiar.

Na rysunku 16 przedstawiono wzbudnik do badania wirników z umieszczonym wewnątrz czujnikiem indukcyjnym. Czujnik wykonany jest z dwóch ruchomych rdzeni z nawiniętymi na nich cewkami. Taka budowa czujnika zapewnia najlepszy kontakt z powierzchnią badanego wirnika.



Rys. 15. Czujnik indukcyjny do badania stojanów



Rys. 16. Wzbudnik wraz z czujnikiem indukcyjnym do badania wirników

7. Podsumowanie

Opracowany przez autorów system pomiarowy do diagnostyki obwodów magnetycznych maszyn indukcyjnych i komutatorowych jest konkurencyjny w stosunku do oferty rynkowej zarówno pod względem ceny jak i funkcjonalności. Zaproponowany przez autorów wskaźnik uszkodzenia izolacji k_z jest znacznie bardziej selektywny od sygnału napięcia czujnika in-

dukcyjnego i pozwala jednoznacznie zlokalizować uszkodzenie. Dobre wyniki uzyskane podczas testów laboratoryjnych i w warunkach przemysłowych oraz łatwość wykonywania pomiarów spowodowały, że przedstawiony system pomiarowy został z powodzeniem wdrożony w zakładach zajmujących się remontami maszyn elektrycznych. Sposób wykrywania uszkodzeń i oraz opracowany system pomiarowy został zgłoszony do Urzędu Patentowego RP [7].

Literatura

- [1]. David Bertenshaw : Improvements in Testing Stator Core Condition of Medium to Large Motors. Presented to CWIEME Conference, Berlin, July 2000
- [2]. Patent US 6469504 -Method and system for detecting core faults. Inventors: Kliman.....
Date of filing: 28.07.2000
- [3]. EU Patent 1 318 411 -A method and apparatus for testing laminated cores of electrical machines .
Inventor: Sutton, John.
Date of filing: 02.12.2002
- [4]. Sang Bin Lee, Gerald B. Kliman, Manoj R. Shah, N. Kutty Nair and R. Mark Lusted: An Iron Core Probe Based Inter-Laminar Core Fault Detection Technique for Generator Stator Cores. IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 20, NO. 2, JUNE 2005
- [5]. MOTOR CORE TESTER MCT 2 – ADWEL INTERNATIONAL LTD .
- [6]. DIGITAL EL-CID™ MODEL 601 – ADWEL INTERNATIONAL LTD.
- [7]. Zgłoszenie patentowe nr P-386 432, Sposób i układ do wykrywania uszkodzeń obwodów magnetycznych maszyn elektrycznych, Data zgłoszenia 04.11.2008.

Autorzy

dr hab. inż. Witold Rams prof. nz. AGH,
rams@agh.edu.pl;
mgr inż. Tomasz Lerch, lerch@agh.edu.pl;
mgr inż. Michał Rad, rad@agh.edu.pl;
Katedra Maszyn Elektrycznych AGH, Kraków.