

Piotr Paduch, Sławomir Szymaniec
Politechnika Opolska, Opole

CZUJNIKI DO POMIARU WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH W UZWOJENIACH MASZYN ELEKTRYCZNYCH

DETECTORS FOR MEASUREMENT OF PARTIAL DISCHARGES IN WINDING OF ELECTRIC MACHINES

Abstract: During own tests, the authors have developed own structures of antenna detectors based on RTDs, used for measurement of partial discharges in electric machines. The detectors can still measure the temperature. The author demonstrate high usefulness of RTD-type antenna systems in measurements of partial discharges in motors. Measuring instruments can be installed without stopping the motor, using factory-made temperature sensors and their take-offs located outside of the motor. The measurement of partial discharges by individual RTDs situated in motors enables to locate the place of partial discharge generation, i.e. the place where winding insulations are weakened. The authors suggest to include the aforementioned comments in design of new electric motors in order to ensure factory preparation of motors for such measurements.

1. Wstęp

Jako maszyny elektryczne napędzające inne urządzenia najczęściej stosowane są silniki elektryczne indukcyjne z wirnikiem klatkowym. Wynika to z kilku przyczyn: między innymi z racji przystępnej ceny i stosunkowo dużej niezawodności. Szczególne miejsce zajmują tutaj silniki na napięcie 6 kV – silniki wysokonapięciowe (WN). Stanowią one najważniejsze napędy w zespołach maszynowych w krajowych zakładach przemysłowych. Prawidłowa eksploatacja i diagnostyka tych silników jest jednym z najważniejszych zadań dla służb technicznych w przemyśle i energetyce. Złożona struktura materiałów izolacyjnych stosowanych w silnikach indukcyjnych WN i specyfika procesu technologicznego ich układu izolacyjnego [1÷5, 7, 8] mogą być przyczynami powstania wewnętrznych defektów – najczęściej w postaci wtrącin powietrznych, obszarów o zmiennej przenikalności dielektrycznej, ostrych mikro nierównomierności powierzchniowych, itp. Układy izolacyjne silników WN pracują w warunkach wieloczynnikowego narażenia [7, 8], co powoduje, że w czasie eksploatacji maszyn powiększają się defekty już istniejące oraz powstają nowe. Procesowi starzenia się izolacji towarzyszy zjawisko wyładowań niepełnych – wnz. Wyładowania niepełne (Partial Discharge – PD) są wyładowaniami występującymi wewnątrz układu izolacyjnego, które tylko częściowo zwierają izolację między przewodnikami, które mogą być przyległe lub nie do przewodnika [7]. Są one ogólnie uważane za

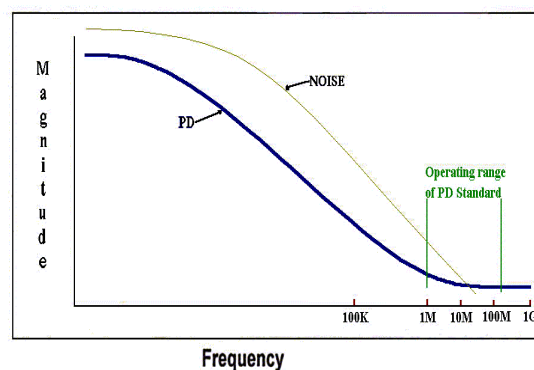
wyładowania lokalne w izolacji i w wielu przypadkach ze znacznym wyprzedzeniem poprzedzają całkowite przebicie izolacji [1÷5, 7, 8]. Ogólnie wnz mają zwykle postać impulsów o czasie trwania krótszym od 1 μ s [7]. Jeżeli lokalne pole elektryczne przekroczy określoną granicę inicjacji wyładowania (np. dla powietrza $E \geq 3$ kV/mm [7]) w obecności elektronu startowego formuje się lawina elektronów [7]. Zjawisko to jest ograniczone w przestrzeni i ma charakter przejściowy [7]. Skutkiem oddziaływania tego typu zjawisk na układ izolacyjny jest stopniowe jego osłabienie, w szczególności w wyniku kumulowania się uszkodzeń przy niegasnących wnz [7]. Jest to składnik starzenia eksploatacyjnego izolacji. Jak wynika z badań [1÷5, 7, 8], wnz są głównym objawem uszkodzenia izolacji wywołanego jej zestarzeniem. Z tego powodu detekcja wnz izolacji jest ważnym elementem oceny jej stanu [1÷5, 7, 8]. Na izolację uzwojeń maszyn elektrycznych dobiera się materiały, które cechuje duża odporność na wnz. Materiałem takim jest np. mika. Jak wykazują badania [1÷5, 7, 8], maszyny elektryczne w tym silniki WN mające izolację na bazie miki mogą pracować przy ładunku wnz rzędu tysięcy pC. Pomimo swej lokalnej natury, wnz są zjawiskiem niezwykle złożonym, wykazują zachowania chaotyczne, niestacjonarne [1÷5, 7, 8]. Złożoność tego zjawiska wynika z dużej liczby i różnorodności warunków geometrycznych i materiałowych, w których wnz mogą zaistnieć.

W ostatnich kilku latach obserwuje się coraz częściej wykorzystywanie wnz do diagnostyki stanu izolacji maszyn elektrycznych WN, głównie dzięki szybkiemu rozwojowi techniki cyfrowej, która może przetwarzać i analizować informacje z pomiarów wnz [1÷5, 7, 8]. Prowadząc regularne pomiary wnz w trybie on-line uzyskuje się możliwość wyznaczenia zmian poziomu wnz w czasie. Gwałtowne, trwałe zmiany poziomu wnz mogą wskazać na pojawiające się nowe uszkodzenie izolacji lub zintensyfikowanie się uszkodzenia istniejącego. W trybie on-line poszczególne pomiary wnz nie zawsze uzyskiwane są w takich samych warunkach pomiarowych, ponieważ parametry pracy maszyn zmieniają się w czasie eksploatacji. Metoda porównywania pomiarów wnz w trybie on-line z bazą danych producentów maszyn lub producentów urządzeń, zawierającą tysiące wyników pomiarów, która coraz częściej jest prowadzona w Kanadzie i USA, przynosi szereg cennych i oczekiwanych przez służby techniczne informacji diagnostycznych. Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych metodą wnz w trybie on-line nie są pozbawiona pewnych ograniczeń. Do najistotniejszych należy zaliczyć wpływ zakłóceń. Oceniając pomiary wykonywane w warunkach przemysłowych, trzeba odróżnić wnz występujące w badanej maszynie od zakłóceń. Problem zakłóceń po części rozwiązują same przyrządy pomiarowe, które wykonują pomiary w układzie różnicowym (przyrząd PDA)[1, 7, 8]. PDA dokonuje porównania różnicowego impulsów wnz. W oparciu o różnicę w czasie przejścia impulsów do PDA przeprowadzana jest klasyfikacja na impulsy wnz pochodzące z izolacji uzwojenia oraz impulsy pochodzące od zakłóceń. W ocenie własnej do pomiarów stanu izolacji w trybie on-line metodami elektrycznymi można wykorzystywać cztery rodzaje czujników:

- pojemnościowe,
- przekładniki prądowe w.cz.,
- cewki Rogowskiego,
- anteny.

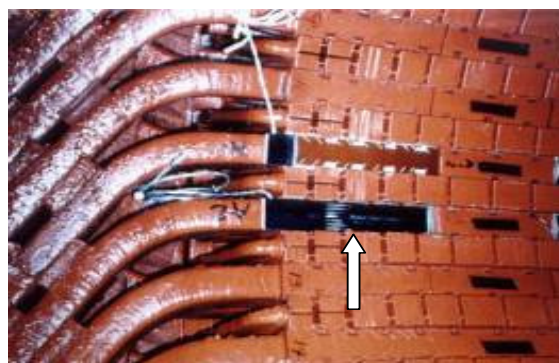
Jako anteny najczęściej są stosowane; czujniki typu termorezystorty – RTD (Resistance Temperature Detector) oraz czujniki paskowe SSC (Stator Slot Couplers) [7]. Dobór anten do pomiarów wnz w silnikach, zdaniem autorów powinien być poprzedzony wyborem zakresu pomiaru wnz ze względu na wpływ zakłóceń przemysłowych. Należy ustalić zakres częstotliwości sygnału wnz, w którym jest najko-

rzystniejszy stosunek sygnału do zakłóceń. Długoletnie badania przemysłowe w tym zakresie prowadziła firma ADWEL. Ustalono, że najkorzystniejszy jest zakres od 1÷150 MHz (PDA PREMIUM) [1]. Na rys.1. przedstawiono w uproszczonej graficznej formie rezultaty badań. Firma VIBROCENTER prowadząc podobne badania w późniejszym okresie ustaliła, że najkorzystniejszy jest zakres od 1÷20 MHz. Autorzy w swoich badaniach przyjęli do pomiarów wnz silników zakres od 1÷20 MHz.



Rys. 1. Widmo wnz (PD) maszyn elektrycznych w czasie ich eksploatacji oraz widmo zakłóceń wg firmy ADWEL[1]

Istnieje możliwość dopasowania szerokości anteny do rozmiarów żłobka. Antena mierzy wnz zarówno przy wyjściu uzwojenia ze żłobka jak i z wnętrza żłobka. Czujniki SSC instalowane są w generatorach i silnikach w żłobkach pod klinami - rys. 2. Zazwyczaj do pełnego

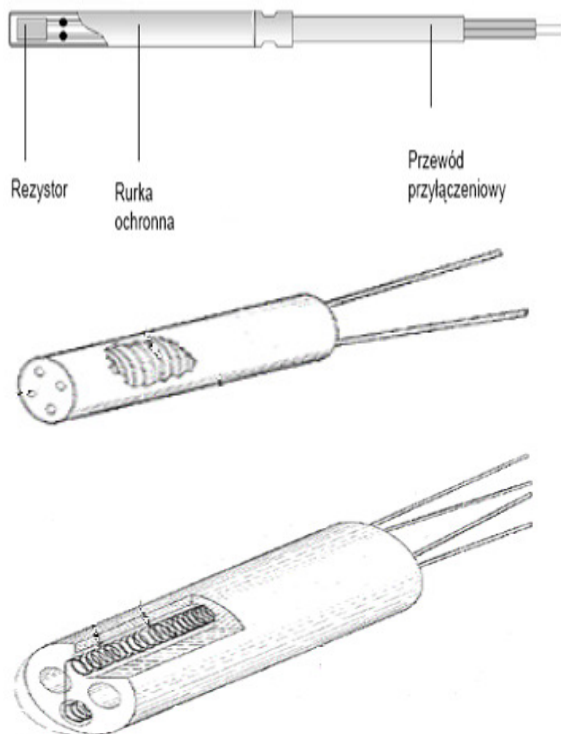


Rys. 2. Antena paskowa umieszczona w żłobkach, widok ogólny

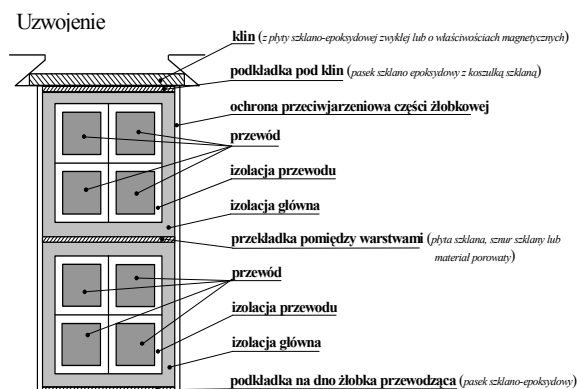
monitoringu wystarcza komplet 6 anten, jednak dla większych generatorów liczba czujników wzrasta. Antena ma bardzo dobrą czułość a ponadto jest odporna na wszelkiego rodzaju zakłócenia zewnętrzne i wewnętrzne, wszystkie impulsy o czasie trwania dłuższym niż 6 ns są traktowane jak zakłócenia [7].

2. Anteny wykorzystujące termorezystory RTD

Anteny do pomiarów wzn w silnikach, wykorzystujące czujniki temperatury typu termorezystory Pt100 autorzy opracowali we własnym zakresie [8]. Termorezystory Pt100 – rys.3 są powszechnie stosowane w silnikach elektrycznych do pomiarów temperatury uzwojeń stojana.

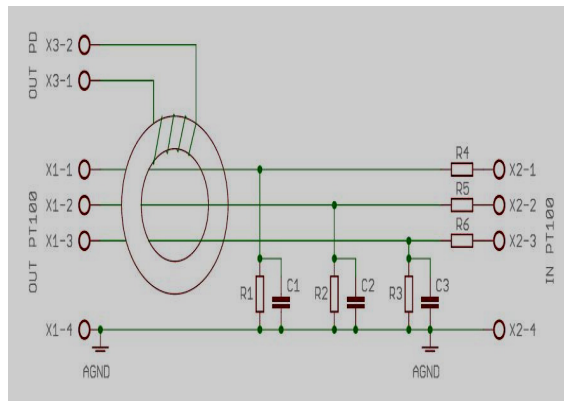


Rys. 3. Przykładowe konstrukcje czujników termorezystancyjnych



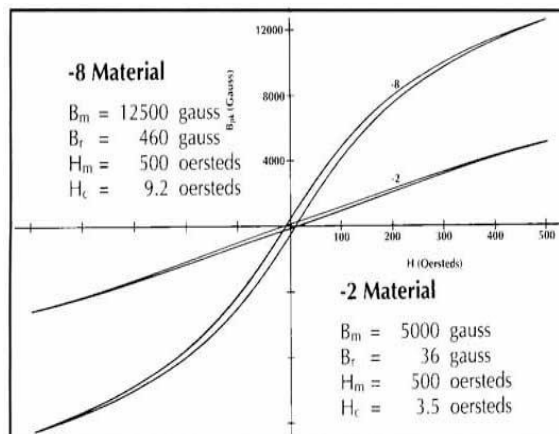
Rys. 4. Przekrój żłobka stojana dla różnych wariantów izolacji

Montuje się je fabrycznie w danym żłobku w miejsce wyciętej przekładki międzywarstwowej uzwojenia – rys.4. Autorzy na drodze eksperymentalnej opracowali antenę, której części składowe przedstawiono na rys. 5.



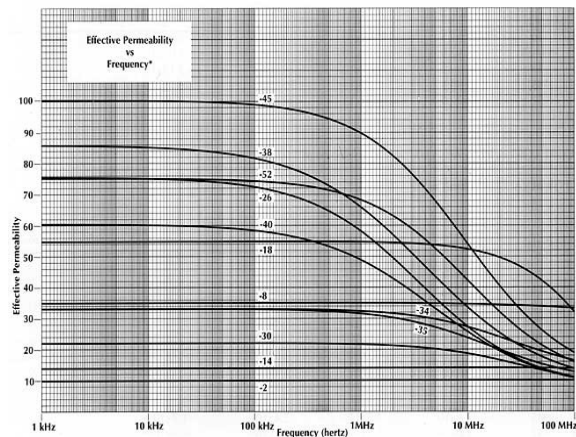
Rys. 5. Rysunek poglądowy idei anteny na bazie termorezystora Pt100, termorezystor + układ galwanicznej separacji

Do detekcji impulsów wzn wykorzystano rdzeń toroidalny typu RTP ze sproszkowanego żelaza pracujący w paśmie do 200 MHz, zwykle oznaczony kolorem czarnym lub czerwono-czarnym, o wysokiej stabilności temperaturowej parametrów magnetycznych, często wykorzystywany w obwodach o dużej dobroci, na którym nawinięto uzwojenie pomiarowe. Przeprowadzone próby i zbudowane prototypy urządzenia z wykorzystaniem innego typu rdzeni nie przyniosły oczekiwanych wyników. Charakterystyki – magnesowania w funkcji częstotliwości (materiał nr 2) przedstawia rysunek 6 i 7.



Rys. 6. Charakterystyka magnesowania materiału rdzenia

Tak wykonany czujnik wzn umożliwia jednoczesny pomiar temperatury i wzn. Termorezystor w roli anteny umożliwia pomiar wzn przy pełnej izolacji, a sygnał indukuje się w uzwojeniu pomiarowym nawiniętym na rdzeniu toroidalnym. W warunkach pomiarowych jest



Rys. 7. Charakterystyka częstotliwościowa rdzenia

możliwe podłączenie czujników PT100 zarówno dwuprzewodowych, jak i trójprzewodowych. Znajdujące się na płycie filtry (elementy R1 do R6 i C1 do C3) zapewniają bezzakłócony pomiar temperatury. Przeprowadzone testy wykazały pełną przydatność tak wykonanego czujnika do monitoringu wyładowań niezupełnych. Antena to otwarty obwód drgający LC. Obwód staje się „otwarty” to znaczy przekształca się w antenę, gdy jego długość stanowi istotną część długości fali, na którą obwód został nastrojony. Jakość anteny, jako elementu odbierającego jest tym wyższa, im długość jej jest bardziej zbliżona do $\frac{1}{4}$ lub $\frac{1}{2}$ długości fali. Antena zaczyna wydajnie pracować, jeżeli jej długość przekracza $\frac{1}{10}$ długości fali [6]. Długość anteny musi być odpowiednią wielokrotnością długości fali λ :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

gdzie: λ - długość fali [m],

c - prędkość światła (3×10^8 m/s),

f - częstotliwość [Hz].

Zależność między pojemnością, indukcyjnością a częstotliwością w obwodzie rezonansowym można wyrazić wzorem:

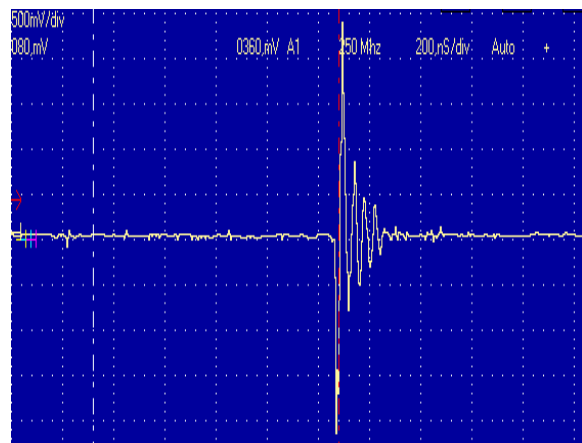
$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{LC}} \quad (2)$$

gdzie: f - częstotliwość [Hz],

L - indukcyjność układu antenowego [H],

C - pojemność układu antenowego [F].

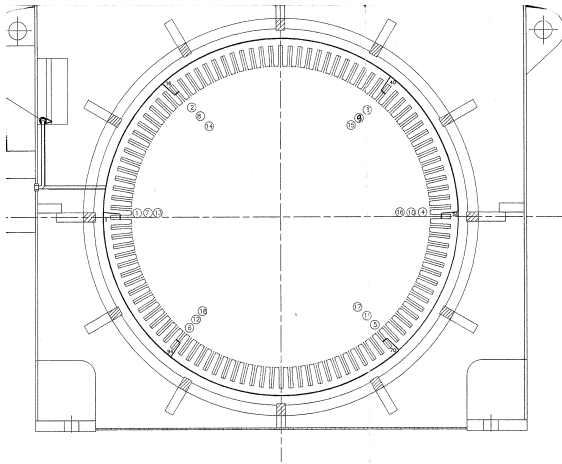
W układach antenowych zastosowanych w silnikach, autorzy starali się ustawić częstotliwość rezonansową anten na 10 MHz, wykorzystując do tego indukcyjności i pojemności: Pt100, przewodów dołączonych do termorezystorów oraz umieszczone na płycie drukowanej zespołu antenowego pojemności i indukcyjności. Starano się również drogą eksperymentalną ustalić pasmo przenoszenia anten na zakres od $1 \div 20$ MHz [8]. Na rys. 8 przedstawiono przykładowy oscylogram napięcia z anteny na bazie czujnika Pt100 w czasie pomiarów wzn jednego z silników przemysłowych (rys. 8 i 9). Na rys. 9. przedstawiono rozmieszczenie czujników Pt-100 w żłobkach stojana badanego silnika. Rys. 10 przedstawia widok badanego stojana silnika oraz stanowisko pomiarowe w czasie kalibracji torów pomiarowych. Na rys.11 przedstawiono przykładowy silnik poddany pomiarom diagnostycznym, silnik o mocy 630kW, napędzający młyn węgla. Na rys.12 przedstawiono wynik pomiarów wzn tego silnika z wykorzystaniem fabrycznie zamontowanych w silniku termorezystorów Pt100. Spośród 6 termorezystorów, 5 nadawało się do pomiarów wzn, w torze pomiarowym jednego z termorezystorów była przerwa. Silnik poddano również rutynowym



Rys. 8. Przykładowy oscylogram napięcia z anteny na bazie czujnika Pt100 w czasie pomiarów wzn jednego z silników przemysłowych

pomiarom izolacji głównej testem Meggera. Instalację aparatury pomiarowej do pomiarów wzn wykonano bez zatrzymywania silnika - rys.12. W wyniku pomiarów wzn stwierdzono, że izolacja uzwojeń silnika wymaga gruntownego oczyszczenia - rys.13. Test Meggera nie wykazywał szczególnych anomalii w izolacji głównej. Silnik w dogodnym technologicznie czasie zatrzymano, uzwojenia gruntownie oczyszczono, izolację poddano regeneracji na czo-

łach. Kontrolne pomiary wzn silnika po wykonaniu tych zabiegów wykazały kilkukrotne zmniejszenie poziomu wzn - rys. 14.



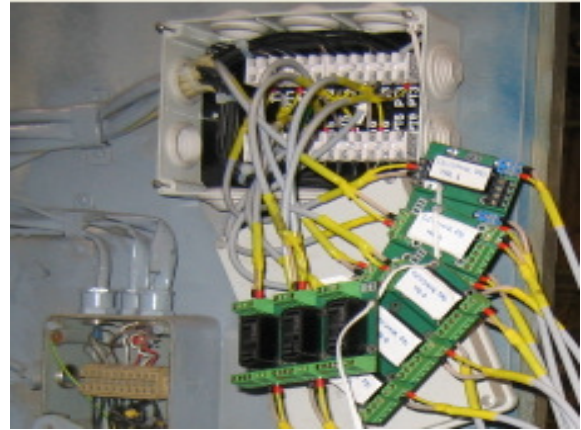
Rys. 9. Rozmieszczenie czujników PT-100 w żłobkach stojana badanego silnika



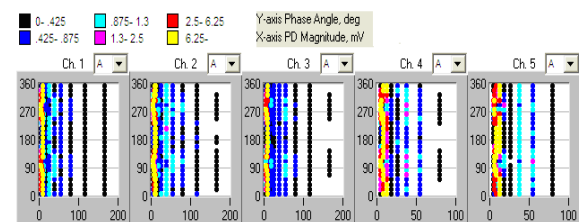
Rys. 10. Widok badanego stojana silnika oraz stanowisko pomiarowe w czasie kalibracji torów pomiarowych



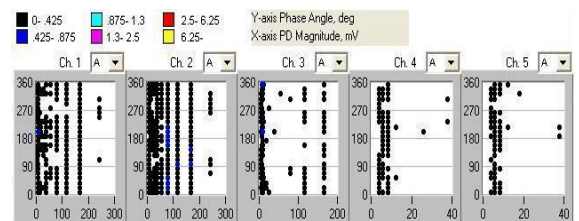
Rys. 11. Widok badanego silnika o mocy 630 kW oraz stanowisko pomiarowe w czasie pomiarów izolacji głównej przy użyciu testu Meggera



Rys. 12. Rozmieszczenie czujników antenowych w badanym silniku



Rys. 13. Przykładowe wyniki pomiarów wzn silnika o mocy 630kW, tzw. wykresy fazowo-rozdzielcze przed czyszczeniem izolacji



Rys. 14. Przykładowe wyniki pomiarów wzn silnika o mocy 630kW, tzw. wykresy fazowo-rozdzielcze po czyszczeniu i regeneracji izolacji

3. Uwagi końcowe

W trakcie badań własnych autorzy opracowali własne konstrukcje czujników antenowych na bazie czujników typu termorezystory RTD służące do pomiarów wyładowań niepełnych w maszynach elektrycznych. Czujniki te w dalszym ciągu mogą mierzyć temperaturę. Autorzy wykazali bardzo dużą użyteczność w pomiarach wyładowań niepełnych silników układów antenowych typu termorezystory RTD. Termorezystory RTD mają dużą czułość na wzn powstające blisko danego RTD, zależy to od budowy danego silnika, czułość ta w ocenie autorów jest rzędu $0,3 \pm 0,02$ V/nC. Instalację aparatury pomiarowej można wykonać bez zatrzymywania silnika, korzystając z fabrycznie zamontowanych czujników temperatury i ich wy-

przewodzeń znajdujących się na zewnątrz silnika. Pomiar wnz przez poszczególne termorezystory umieszczone w silniku daje możliwość lokalizowania miejsc generowania wnz, czyli miejsc osłabienia izolacji uzwojeń. Autorzy proponują powyższe uwagi uwzględnić przy projektowaniu nowych silników elektrycznych, aby już fabrycznie przygotować silnik do takich pomiarów. W pomiarach wnz silników, istotnym uzupełnieniem termorezystorów zainstalowanych fabrycznie mogą być RTD zainstalowane dodatkowo w czasie przeglądu silnika bądź jego remontu od strony napędowej i przeciwnapędowej w obszarach najbliższych części czołowej uzwojeń. Szczególnie ważny jest obszar początków uzwojeń fazowych, połączeń międzycewkowych, międzygrupowych. Do pomiarów wnz maszyn elektrycznych w szczególności off-line z powodzeniem można stosować anteny paskowe. Jest to bardzo przydatny pomiar w warunkach stacji prób zakładu remontowego. Można określić obszary uzwojenia mające pogorszoną izolację uzwojeń. Proponowane przez autorów własne rozwiązania czujników do pomiarów wnz w maszynach elektrycznych w warunkach przemysłowych sprawdziły się. Wyniki pomiarów wnz silników zależą od: stanu ich izolacji, obciążenia silnika, temperatury uzwojeń, wilgotności, poziomu zakłóceń zewnętrznych oraz od charakterystyki czujników wnz i aparatury analizującej wnz.

4. Literatura

- [1]. ADWEL: *PD monitoring*. Nota Aplikacyjna. 2003.
- [2]. Bertenshaw D., Sasic M.: *On-line Partial Discharge Monitoring on MV motors-Case studies on Improved Sensitivity Couplers*. Nota Aplikacyjna firmy ADWEL International Canada, 2002.
- [3]. Blokhintsev, M. Golovkov, A. Golubev, C. Kane: *Field Experiences on the Measurement of Partial Discharges on Rotating Equipment*. IEEE PES'98, February 1-5, Tampa
- [4]. Golubev A, Paoletti G.: *Partial Discharge Theory and Technologies related to Medium Voltage Electrical Equipment*. 2000 IEEE. Reprinted, with permission, from Paper 99-25 presented at the IAS 34th Annual Meeting, Oct 3-7, '99, Phoenix, AZ.
- [5]. Kane C., Pozonsky J., Carney S., Blokhintsev I.: *Advantages of Continuous Monitoring of Partial Discharges in Rotating Equipment and Switchgear*. 2003 AISE Meeting, Pittsburgh, PA, Sept. 2003.
- [6]. Matuszczyk J.: *Poradnik antenowy*. WKŁ, Warszawa, 2002.

[7]. Stone G.C., Boulter E.A., Culbert I., Dhirani H.: *Electrical insulation for rotating machines*. IEEE PRESS series on Power Engineering, USA, 2004.

[8]. Szymaniec S.: *Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń i stanu łożysk silników indukcyjnych klatkowych w warunkach przemysłowej eksploatacji*. Studia i Monografie z. 193, Wyd. Politech. Opolskiej, Opole 2006.

Autorzy

mgr inż. Piotr Paduch
Politechnika Opolska.
Wydział Elektrotechniki, Automatyki
i Informatyki.
Instytut Układów Elektromechanicznych
i Elektroniki Przemysłowej.
45-951 Opole ul. Luboszycka 7.
p.paduch@po.opole.pl

Dr hab. inż. Sławomir Szymaniec prof. PO
Politechnika Opolska.
Wydział Elektrotechniki, Automatyki
i Informatyki.
Instytut Układów Elektromechanicznych
i Elektroniki Przemysłowej.
45-951 Opole ul. Luboszycka 7.
s.szymaniec@po.opole.pl

Artykuł napisano w ramach realizacji projektu badawczego własnego Nr N N510 536639 „Czujniki do pomiarów off-line i on-line wylądowań niezupełnych w silnikach elektrycznych oraz system kalibracji torów pomiarowych. Projekt finansowany przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.