

Sławomir Szymaniec
Politechnika Opolska, Opole

FUNKCJA KORELACJI W POMIARACH ON-LINE WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH SILNIKÓW ELEKTRYCZNYCH W PRZEMYŚLE

CORRELATION FUNCTION IN THE ON-LINE MEASUREMENTS OF PARTIAL DISCHARGES OF ELECTRIC MOTORS IN THE INDUSTRY

Abstract: In modern branches of the industry in technically developed countries, electrical machines are increasingly covered by on-line diagnostics involving the condition of winding insulation based on the measurement of partial discharges. The nature of partial discharges accompanying operation of electrical machines is very complex. PD on-line measurements require specialist PD sensors and instruments that analyse PD signals. The analysis of signals for diagnostic purposes should be carried out taking into account the phase-resolved distributions and mutual correlations between PD and load, temperature, humidity and vibrations.

1. Wstęp

Ograniczając w artykule zakres rozważań do diagnostyki stanu izolacji uzwojeń (najważniejsza z punktu widzenia bezpieczeństwa eksploatacji), przeanalizujemy wykorzystanie w pomiarach wyładowań niezupełnych (wnz). Według autora artykułu zauważyć można różne tendencje. Po pierwsze tendencja do stosowania uniwersalnych analizatorów wnz z ulepszonymi osiągnięciami tłumienia szumów i zakłóceń - rys.1. Po drugie tendencja do projektowania urządzeń przenośnych, mobilnych - rys.2. Trzecia tendencja to projektowanie coraz to bardziej złożonych analizatorów, umożliwiających pomiary i analizę sygnałów wnz w bardzo szerokim zakresie z możliwością wykonania badań korelacyjnych. Nowo zaprojektowana aparatura spełnia najczęściej następujące wymagania:

- zastosowanie do różnego rodzaju urządzeń, maszyn wysokonapięciowych (WN),
- duże tłumienia szumów, zakłóceń,
- szeroki zakres dynamiki, np. 80dB,
- możliwość pracy w trybie off-line i on-line,
- łatwy i przyjazny dla użytkownika interfejs oprogramowania,
- w miarę rozsądna cena produktu.

Przykład stacjonarnego analizatora wnz pokazano na rys.1. Zastosowana technologia ograniczania szumów w urządzeniu oparta jest przede wszystkim na:

- odrzuceniu określonego zakresu fazy,
- zatwierdzeniu szerokości impulsów wnz,
- powiązaniu z zewnętrznymi zakłóceniami,

- określeniu związku między sygnałami wyładowań niezupełnych.



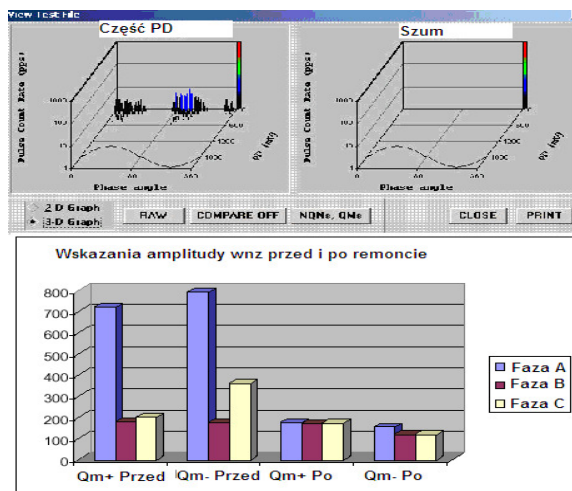
Rys. 1. Własny stacjonarny analizator wnz



Rys.2. Własny mobilny analizator wnz

Przykład pomiarów wykonanych analizatorem wnz dla przykładowego silnika WN potrzeb własnych w jednej z elektrociepłowni, przed remontem i po remoncie izolacji przedstawiono na rys.3. Na rys. tym przedstawiono wykresy fazowo-rozdzielcze wnz (PD) dla sygnału uży-

tecznego i dla szumu oraz wnz przed remontem i po remoncie.



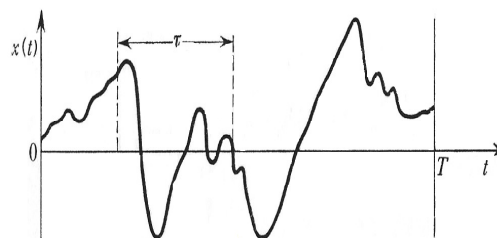
Rys. 3. Wyniki pomiarów wnz przykładowego silnika potrzeb własnych w jednej z elektrowni, wykresy fazowo-rozdzielcze wnz (PD) dla sygnału użytecznego i dla szumu oraz wnz przed remontem i po remoncie

Z przeprowadzonych badań wynika, iż ciągłe pomiary wnz są efektywne i skuteczne. Wczesna ocena stanu izolacji stojana dzięki pomiarom wnz ograniczyła znacznie koszty nieplanowanego postoju maszyny.

2. Zaawansowana analiza i interpretacja wyników pomiaru wnz maszyn elektrycznych

Podstawowe informacje o korelacji

Zjawiska fizyczne bardzo często charakteryzowane są za pomocą wielu cech, właściwości. Jednakże cechy charakterystyczne najczęściej są ze sobą powiązane. Oddziaływania te mogą mieć różną siłę, kształt i kierunek. Istnieje zatem konieczność wspólnego, łącznego badania cech charakteryzujących rozpatrywany proces w celu określenia ich wzajemnych związków [7, 8]. Przy badaniu jakiegokolwiek sygnału, zależności pomiędzy sygnałami od różnych cech mierzalnych można posługiwać się terminami regresji i korelacji. Oba te pojęcia dotyczą zależności między zmiennymi. Korelacja daje możliwość określenia siły tej zależności, a regresja jej kształtu [2].



Rys. 4. Ilustracja idei pomiaru autokorelacji [2]

Funkcja korelacji własnej (autokorelacji)

Autokorelacja sygnału losowego charakteryzuje ogólną zależność wartości sygnału w pewnej określonej chwili od wartości w innej chwili czasu (skorelowanie sygnału $x(t)$ z tym samym sygnałem, ale przesuniętym) (rys.4). Wzór określający funkcję autokorelacji, wiążący wartość $x(t)$ w chwili t i po czasie $t+\tau$ w całkowitym przedziale obserwacji T , przyjmuje postać (1) [2] :

$$R_X(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau) dt \quad (1)$$

gdzie: $R_X(\tau)$ - funkcja korelacji własnej (autokorelacji) sygnału $x(t)$,
 τ - opóźnienie czasowe sygnału,
 T - okres.

Czasami funkcję korelacji definiuje się na podstawie sygnału z odjętymi wartościami średnimi. Funkcję kowariancji, określa wzór (2), [2]:

$$C_{XX}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - \mu_X] \cdot [x(t+\tau) - \mu_X] \cdot dt = R_X(\tau) - \mu_X^2 \quad (2)$$

gdzie: C_{XX} - funkcja kowariancji własnej sygnału,
 μ_X - wartość oczekiwana (średnia) sygnału,
 $R_X(\tau)$ - funkcja korelacji własnej.

Funkcja autokorelacji najczęściej znajduje swoje zastosowanie w badaniu polegającym na określaniu, w jakim stopniu w pewnej określonej chwili mierzona wartość procesu wpływa na wartość tego procesu po upływie pewnego czasu, w przyszłej chwili.

Funkcja korelacji wzajemnej (interkorelacji)

Funkcja autokorelacji stosowana jest do opisywania właściwości pojedynczych sygnałów procesów losowych. Często jednak zachodzi konieczność opisywania pewnych wspólnych połączonych charakterystyk różnych sygnałów

dwóch lub większej liczby procesów losowych. Aby uzyskać charakterystyki łączące realizacją dwóch procesów losowych stosuje się między innymi funkcję korelacji wzajemnej zwaną inaczej interkorelacją [1]. Funkcja korelacji wzajemnej badanych dwóch sygnałów losowych określa wzajemną zależność jednego sygnału od wartości drugiego sygnału w funkcji przesunięcia pomiędzy nimi [1]. Wzór wiążący rozpatrywane dwa sygnały $x(t)$ w chwili t i $y(t)$ w chwili $t+\tau$ w całkowitym przedziale obserwacji T dążącym do nieskończoności, przedstawia wartość interkorelacji (3), [1]:

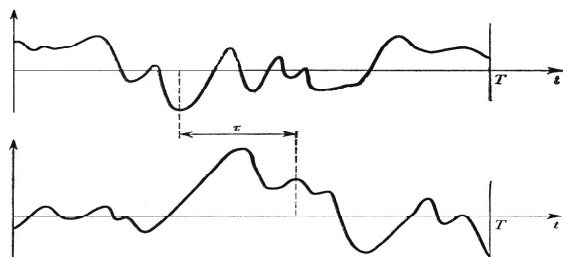
$$R_{XY}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot y(t + \tau) \cdot dt \quad (3)$$

gdzie: $R_{xy}(\tau)$ - funkcja korelacji wzajemnej (interkorelacji) sygnału $x(t)$ i $y(t)$,
 τ - opóźnienie między sygnałami,
 T - okres.

Funkcję korelacji wzajemnej często definiowana jest na podstawie sygnałów z odjętymi wartościami średnimi. W niektórych opracowaniach statystycznych nazywana jest funkcją kowariancji i przyjmuje następującą postać [3]:

$$C_{XY}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - \mu_X] \cdot [y(t + \tau) - \mu_Y] \cdot dt \quad (4)$$

gdzie: C_{XY} - funkcja kowariancji własnej sygnału,
 μ_X, μ_Y - wartość oczekiwana (średnia) sygnału,
 $R_{xy}(\tau)$ - funkcja korelacji wzajemnej



Rys. 5. Ilustracja idei pomiaru korelacji wzajemnej [1]

Własności funkcji interkorelacji znajdują zastosowanie w celu pomiaru czasu opóźnienia, wyznaczenia toru sygnału oraz wykrywania sygnałów w szumie i ich odtwarzania. W analizie sygnałów pomiarowych czasami wygodniej jest posługiwać się jednym współczynnikiem liczbowym określającym relacje, jakie zachodzą pomiędzy badanymi sygnałami, niż funkcją bę-

dącą zbiorem ich wartości i argumentów. Dla tego też definiuje się współczynnik kowariancji określony wzorem (5), [3]:

$$\text{cov}[x(t), y(t)] = C_{XY}(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - \mu_X] \cdot [y(t) - \mu_Y] \cdot dt \quad (5)$$

Z kolei unormowaną wartość $\text{cov}[x(t), y(t)]$ nazywamy współczynnikiem korelacji:

$$\rho[x(t), y(t)] = \frac{\text{cov}[x(t), y(t)]}{\sqrt{\sigma_X^2 \cdot \sigma_Y^2}} \quad (6)$$

gdzie: $\sqrt{\sigma_X^2}$ - odchylenie standardowe zmiennej x ,
 $\sqrt{\sigma_Y^2}$ - odchylenie standardowe zmiennej y ,
 $\text{cov}[x(t), y(t)]$ - współczynnik kowariancji zmiennej x i y

przy czym należy pamiętać o granicach wartości, jakie współczynnik przyjmuje [2]:

$$-1 \leq \rho[x(t), y(t)] \leq 1 \quad (7)$$

gdzie: $\rho[x(t), y(t)]$ - współczynnik korelacji liniowej Pearsona

Współczynnik korelacji przyjmuje wartości z przedziału od -1,00 do +1,00. Wartość -1,00 reprezentuje idealną korelację ujemną, a wartość +1,00 idealną korelację dodatnią. Wartość 0,00 wyraża brak korelacji między zmiennymi. Zarówno kowariancja, jak i współczynnik korelacji są wielkościami miary współzależności między zmiennymi $x(t)$ i $y(t)$. Jeżeli zachodzą zdarzenia $x(t) > x_0$ i $y(t) > y_0$, (x_0, y_0 - wartość dla zmiennej x i y w zerze), czyli obydwa badane sygnały zmieniają swoje wartości w „podobny” sposób, mówimy wtedy o dodatniej kowariancji (korelacji) tych sygnałów, a wartości powyższych współczynników określają stopień tego podobieństwa. Korelacja ujemna występuje wtedy, gdy wzrostowi wartości jednej zmiennej odpowiada spadek średnich wartości drugiej zmiennej. Najczęściej spotykanym współczynnikiem korelacji w różnego rodzaju publikacjach [2÷6] jest tzw. współczynnik korelacji r Pearsona, nazywany również współczynnikiem korelacji liniowej.

Korelacja w pomiarach wyładowań niezupełnych w trybie on-line

W trakcie pomiarów, obok badania wewnętrznych czynników mających wpływ na generowanie wnz ocenia się i bada wpływ czynników zewnętrznych, które oddziałują na powstanie wyładowań. Na intensywność wyładowań niezupełnych mogą mieć wpływ [5, 8]:

- napięcie,
- temperatura,
- obciążenie maszyny,
- wilgotność,
- ciśnienie.
- drgania.

Wpływ napięcia

Napięcie może mieć znaczący wpływ na powstawanie wnz. Większa wartość napięcia powoduje większe prawdopodobieństwo wystąpienia wyładowań niezupełnych [3÷7].

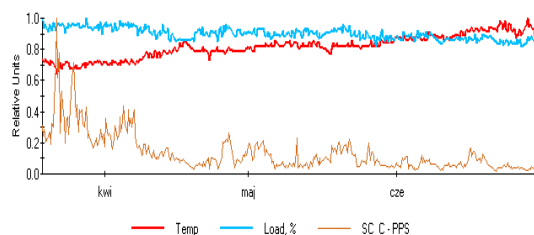
Wpływ temperatury

Temperatura ma bardzo duże znaczenie w analizie wnz. Zarówno wzrost, jak i zmniejszenie się temperatury wpływa na intensywność wnz. Uzależnione jest to od typu wady jaka występuje w izolacji. Dwie wady izolacji mające podobną fazę na wykresie fazowo-rozdzielczym można rozpoznać bliżej po określeniu wpływu temperatury. Należy określić korelację pomiędzy intensywnością wnz i temperaturą. Różne materiały odpowiadają w różny sposób na zmiany temperatury. Te zmiany mogą być niewielkie przy małych zmianach temperatury i duże dla większych zmian. Wykonywanie pomiarów wyładowań niezupełnych dla tego samego obciążenia maszyny, ale przy różnych temperaturach może być pomocne przy dalszym określaniu możliwych mechanizmów uszkodzeń izolacji.

Ujemny efekt temperaturowy

Rozmiary szczelin izolacji uzwojeń stojana są zazwyczaj odwrotnie proporcjonalne do temperatury. Gdy temperatura wzrasta, miedź i inne materiały tworzące izolację rozszerzają się powodując zmniejszanie szczelin, a tym samym zmniejszenie wyładowań. Jest to szczególnie widoczne dla uzwojeń z izolacją bitumiczną i poliestrową, ale można także zaobserwować to zjawisko dla izolacji epoksydowej. Większy efekt temperaturowy występuje tam, gdzie jest większe rozwarstwienie izolacji. Na rys. 6. przedstawiono przykład korelacji ujemnej po-

między wnz i temperaturą dla przykładowego silnika.



Rys. 6. Negatywna korelacja temperatury i wnz na silniku

Dodatni efekt temperaturowy

Jest prawdopodobne, że dodatnie impulsy wnz będą wzrastały wraz z temperaturą. To zjawisko obserwuje się przy uszkodzeniach warstwy półprzewodnikowej. Gdy temperatura uzwojeń stojana wzrasta, rezystancja tych warstw wzrasta powodując tym samym większą aktywność wyładowań na powierzchni.

Wpływ obciążenia

Wpływ obciążenia maszyny na wzrost poziomu wnz jest związane z działaniem sił na uzwojenie maszyny elektrycznej. Złe wykonanie maszyny, np. słabe zaklinowanie uzwojenia w żłobkach, może być przyczyną jego drgań. Wzrost obciążenia powoduje wzrost prądu przepływającego w uzwojeniu, co z kolei prowadzi do wzrostu sił działających na uzwojenia. Uzwojenie w poluzowanych żłobkach wprawiane jest w drgania, które oddziałują na szczelinę w izolacji tego uzwojenia. Dla luźnych uzwojeń wnz bardzo silnie zależą od obciążenia i poziom impulsów dodatnich będzie rósł wraz z obciążeniem. Ten efekt jest bardzo znaczący dla luźnych uzwojeń twardych termoutwardzalnych np. z izolacją epoksydowo-mikową. Uzwojenia z izolacją termoplastyczną (miękkie) rozszerzają się podczas rozgrzewania i dokładnie wypełniają żłobek. Jeżeli występuje zależność wyładowań od obciążenia istnieje zawsze obawa, że luźne uzwojenia mogą doprowadzić do przedwczesnego uszkodzenia uzwojeń.

Wpływ wilgotności

Wilgotność to kolejny czynnik zewnętrzny, mający wpływ na występowanie wnz. Dla obiektów chłodzonych powietrzem obserwuje się negatywną korelację z intensywnością wnz. Oznacza to, że wzrost wilgotności powoduje zmniejszanie się wyładowań. Z kolei wzrost wilgotności razem ze wzrostem wnz obserwuje

się przy obserwacji wyłączeń w rozdzielnicach. Związane jest to z tym, iż higroskopijność materiałów lub cząsteczki wody na materiałach izolacyjnych mogą zmieniać zewnętrzne przewodnictwo tych materiałów i w konsekwencji może to powodować powstawanie na niektórych obszarach dodatkowych wnz. W tabeli 1 przedstawiono wyniki badań [4, 5] wzajemnych zależności wnz oraz obciążenia i temperatury dla maszyn elektrycznych.

Tabela 1. Wyniki badań [4, 5, 6] wzajemnych zależności wnz oraz obciążenia i temperatury dla maszyn elektrycznych

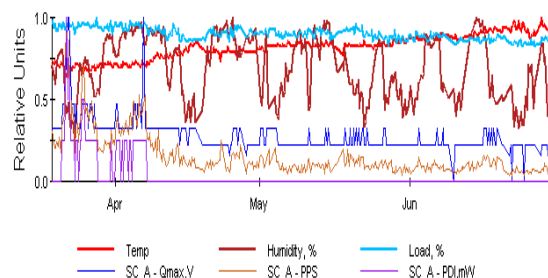
Mechanizm uszkodzeń	Polaryzacja	Efekt obciążeniowy	Efekt temperatury
Luźne uzwojenia	Dominuje dodatnia	Wzrost impulsów dodatnich	Ujemny
Wyładowania żłobkowe	Dominuje dodatnia	Brak efektu	Ujemny
Niewłaściwa impregnacja izolacji	Brak dominacji	Brak efektu	Ujemny
Zanieczyszczenia	Brak dominacji	Brak efektu	Nieprzewidywalny
Niewłaściwe odległości między cewkami	Brak dominacji	Brak efektu	Nieprzewidywalny
Pogorszenie stanu warstwy półprzewodnikowej	Dominuje dodatnia	Brak efektu	Wzrost wnz dodatnich z temperaturą

3. Przykłady pomiarów wnz w warunkach przemysłowych

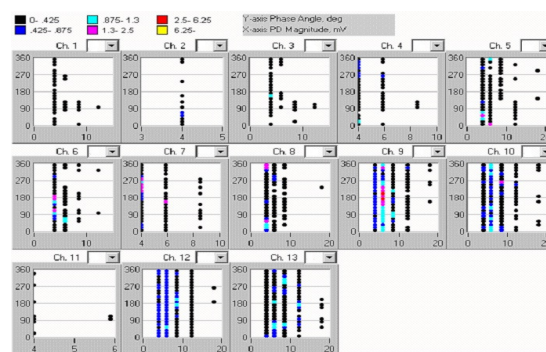
Czołowe firmy zajmujących się pomiarami i analizą wnz oferują wraz z aparaturą pomiarową oprogramowanie, które posiada możliwość zastosowania funkcji korelacji. Autor artykułu w aparaturze swojej konstrukcji w opcji analizy wyników pomiarów stosuje również opcję liczenia funkcji korelacji [8], w szczególności:

- trendu wraz z wykresem wnz, prądu, temperatury, wilgotności oraz wykresu wzajemnych korelacji,
- trendu wnz w oparciu o maksymalne i uśrednione wartości,
- wykresów 3D wyłączeń.

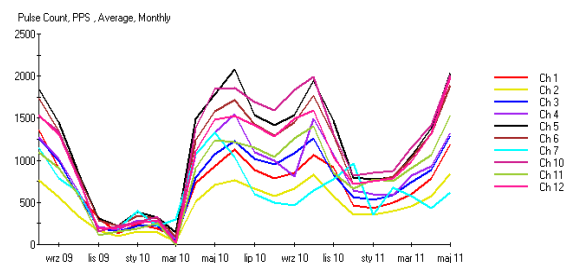
Na rys.6÷9 przedstawiono wyniki pomiarów dla przykładowego silnika elektrycznego. Silnik poddany jest badaniom on-line od 3 lat.



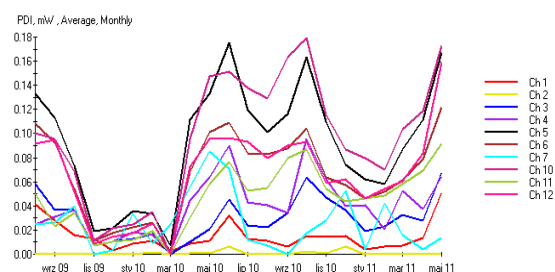
Rys.6. Wykres w czasie wzajemnych zależności parametrów wnz, temperatury, wilgotności i obciążenia przykładowego silnika elektrycznego, pomiary wykonane przez autora



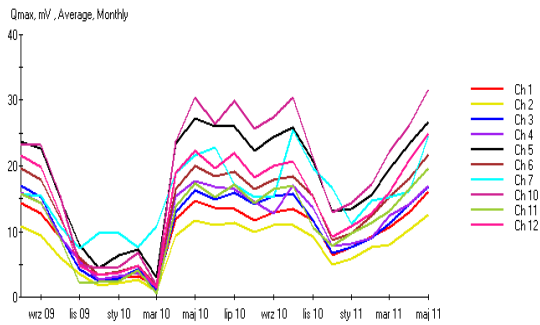
Rys. 7. Rozkład fazowy, amplituda i intensywność wyłączeń na poszczególnych kanałach, tzw. wykresy fazowo-rozdzielcze



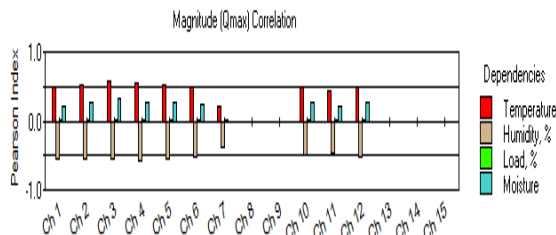
Rys. 8. Silnik o mocy 1000 kW, 6 kV, pomiar wnz na wszystkich kanałach w cyklu miesięcznym, wykresy trendu średniej wartości PPS (częstotliwości wnz)



Rys. 9. Silnik o mocy 1000 kW, 6 kV, pomiar wnz na wszystkich kanałach w cyklu miesięcznym, wykresy trendu średniej wartości PDI



Rys. 10. Silnik o mocy 1000 kW, 6 kV, pomiar wnz na wszystkich kanałach w cyklu miesięcznym, wykresy trendu średniego wartości Q_{max}



Rys. 11. Pomiaru korelacji dla Q_{max}

4. Uwagi końcowe

W nowoczesnych gałęziach przemysłu w krajach wysoko rozwiniętych technicznie coraz częściej maszyny elektryczne objęte są diagnostyką on-line stanu izolacji uzwojeń w oparciu o pomiar wylądowań niezupełnych. Charakter wylądowań niezupełnych towarzyszących pracy maszyn elektrycznych jest bardzo złożony. Pomiar wnz on-line wymagają specjalistycznych czujników wnz oraz aparatury analizującej sygnały wnz. Analiza sygnałów dla celów diagnostycznych powinna być prowadzona z uwzględnieniem rozkładów fazowo-rozdzielczych oraz wzajemnych korelacji pomiędzy wnz oraz obciążeniem, temperaturą, wilgotnością i drganiami. W miarę upływu czasu eksploatacji maszyn, obserwuje się zmianę intensywności wnz przy charakterystycznych rozkładach fazowo-rozdzielczych i przy charakterystycznych rodzajach korelacji. Informacje z pomiarów diagnostycznych wnz pomagają w prowadzeniu eksploatacji poszczególnych maszyn i polityki remontowej zakładu. W zespole autora prowadzone są intensywne badania w tym zakresie.

5. Literatura

- [1]. ADWEL: *PD monitoring*. Nota Aplikac. 2003.
- [2]. BENDAT J., PIERSOL A.: *Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych*, PWN, Warszawa 1976.

- [3]. Bertenshaw D., Sasic M.: *On-line Partial Discharge Monitoring on MV motors-Casestudies on Improved Sensitivity Couplers*. Nota Aplikacyjna firmy ADWEL International Canada, 2002.
- [4]. 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
- [5]. 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.
- [6]. 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.
- [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.

Autor

Dr hab. inż. Sławomir Szymaniec prof. PO.
 Politechnika Opolska
 Wydział Elektrotechniki, Automatyki
 i Informatyki
 Instytut Układów Elektromechanicznych
 i Elektroniki Przemysłowej
 45-758 Opole ul. Prószkowska 76, bud. nr 1.
 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.