

Sławomir Szymaniec
Politechnika Opolska, Opole

WYKORZYSTANIE FUNKCJI KORELACJI W POMIARACH ON-LINE WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH SILNIKÓW ELEKTRYCZNYCH

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

Abstract: Partial discharges accompanying operation of electric motors have a very complex nature. On-line measurements require specialist partial discharge detectors and partial discharge analysing devices. The analysis of signals for diagnostic purposes should be conducted taking into account phase-resolved distributions and mutual correlations between partial discharges and load, temperature and humidity. Together with progressing use of motors, there is a change in the intensity of partial discharges with typical phase-resolved distributions and typical types of correlations. The paper presents results of measurements of partial discharges in industrial motors, including the correlation function, in particular the Pearson's linear correlation coefficient for parameters of partial discharges as well as load, temperature and humidity. Further research in this respect is necessary.

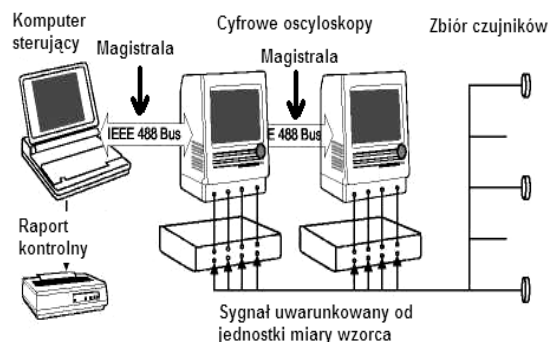
1. Wstęp

Organizacyjna i finansowa atrakcyjność diagnostyki maszyn elektrycznych, a nade wszystko aspekt ekonomiczny oraz ciągły postęp w elektronice cyfrowej i dostępność do niej, zachęcają do konstruowania nowej aparatury do pomiarów wnz. Według autora artykułu zauważyć można trzy tendencje. Po pierwsze tendencja do zaprojektowania uniwersalnego analizatora wnz z ulepszonymi osiągnięciami tłumienia szumów i zakłóceń. Po drugie tendencja do zaprojektowania urządzeń przenośnych, mobilnych. Trzecia tendencja to projektowanie coraz to bardziej złożonych analizatorów, umożliwiających pomiary i analizę sygnałów wnz w bardzo szerokim zakresie. Analizatory te umożliwiają wyznaczenie np. funkcji korelacji. Nowo zaprojektowana aparatura spełnia najczęściej następujące wymagania:

- zastosowanie do różnego rodzaju urządzeń, maszyn wysokonapięciowych (WN),
- duże tłumienia różnego rodzaju 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 uniwersalnego analizatora wnz na bazie dwóch bardzo dobrej jakości oscyloskopów pokazano na rys.1. Jest to miernik z możliwością zarejestrowania 8 niezależnych

sygnałów. Budowę oparto na dwóch 4 kanałowych cyfrowych oscyloskopach.

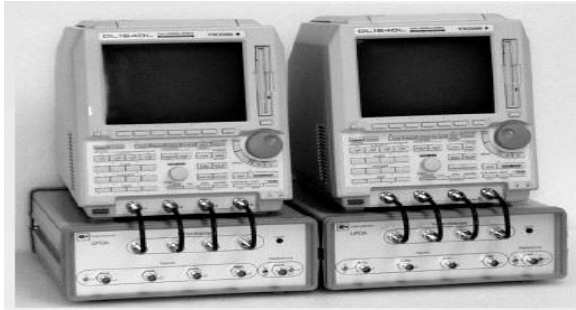


Rys. 1. Schemat blokowy uniwersalnego analizatora wnz

Sygnały mierzone przez czujniki przesyłane są do dwóch oscyloskopów, które pracują synchronicznie. Dane wnz wprowadzane są do wewnętrznej pamięci oscyloskopu. Za pomocą magistrali IEEE 488 zgromadzone dane przesyłane są do komputera sterującego, gdzie zostają przetworzone. Polega to na wykryciu poziomu szumu tła, zatwierdzeniu szerokości użytecznego pulsu, wyszczególnieniu szerokości fazy częstotliwości zasilania. Następnie następuje przekazanie przetworzonych danych do bazy danych. Zastosowana technologia ograniczania szumów w urządzeniu oparta jest przede wszystkim na:

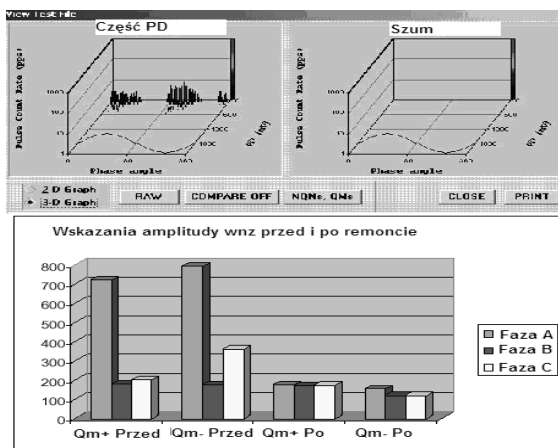
- odrzucenie określonego zakresu fazy,

- zatwierdzenie szerokości impulsów wnz,
- powiązanie z zewnętrznymi zakłóceniami,
- związek połączeń między sygnałami wyładowań niezupełnych.



Rys. 2. Zdjęcie uniwersalnego analizatora wnz

Przykład pomiarów wykonanych uniwersalnym analizatorem wnz dla przykładowego silnika WN przed remontem i po remoncie izolacji przedstawiono na rys.3. Na rys. tym przedstawiono wykresy fazowo-rozdzielcze wnz (PD) dla sygnału użytecznego i dla szumu oraz wnz przed remontem i po remoncie.



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

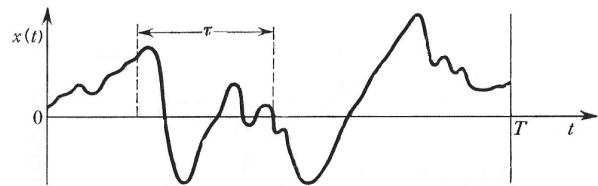
Z przeprowadzonych badań wynika, iż ciągłe pomiary wnz są efektywne i skuteczne. Wczesna ocena stanu izolacji stojana dzięki pomiarom wnz ograniczyła znacznie koszty nieplanowego postoju maszyny

2. Zaawansowane analiza i interpretacja wyników pomiaru wnz maszyn elektrycznych

Podstawowe informacje o korelacji

Opisywane różne 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 [2]. 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 [1]

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 , przyjmując postać (1) [1] :

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

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), [3] :

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

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.

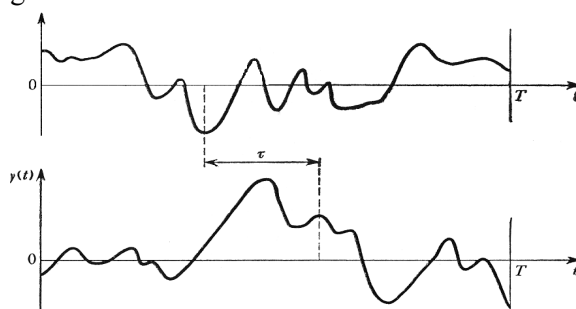
Funkcję korelacji wzajemnej często definiowana jest na podstawie sygnałów z odjętymi wartościami średnimi. W niektórych opracowaniach statystycznych nazywana jest funkcją kowariancji i przyjmuje następującą postać [3]:

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

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

Własności funkcji interkorelacji znajdują zastosowanie w celu pomiaru czasu opóźnienia,

wyznaczenia toru sygnału oraz wykrywania sygnałów w szumie i ich odtwarzania.



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

W analizie sygnałów pomiarowych czasami wygodniej jest posługiwać się jednym współczynnikiem liczbowym określającym relacje, jakie zachodzą pomiędzy badanymi sygnałami, niż funkcją będącą zbiorem ich wartości i argumentów. Dlatego też definiuje się współczynnik kowariancji określony wzorem (5), [3]:

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

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

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

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

przy czym należy pamiętać o granicach wartości, jakie współczynnik przyjmuje [3]:

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

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 [1] 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 poziom, intensywność wyładowań niezupełnych mogą mieć wpływ [5, 8]:

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

Wpływ napięcia

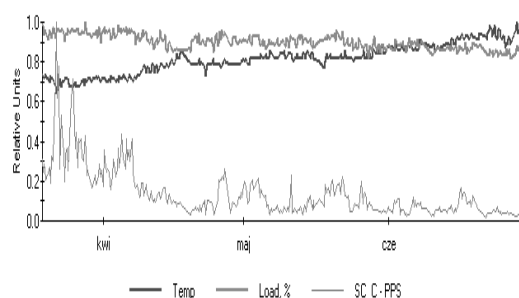
Napięcie może mieć znaczący wpływ na powstawanie wnz. Większa wartość napięcia powoduje większe prawdopodobieństwo wystąpienia wyładowań niezupełnych [7].

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 pomiędzy 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 uzwojenie. 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 wyładowań 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 wyładowań niezupełnych

W tabeli 1 przedstawiono wyniki badań [4, 5] wzajemnych zależności wnz oraz obciążenia i temperatury dla maszyn elektrycznych.

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

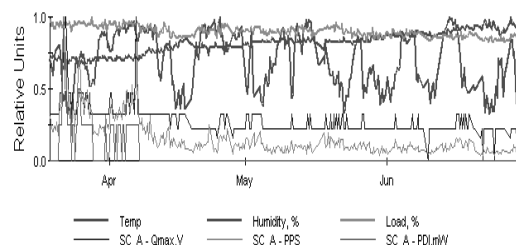
Mechanizm uszkodzeń	Polaryzacja	Effekt obciążeniowy	Effekt temperaturowy
Luźne uzwojenia	Dominuje dodatnia	Wzrost impulsów dodatnich	Ujemny
Wyładowania żłobkowe	Dominuje dodatnia	Brak efektu	Ujemny
Niewłaściwa impregnacja izolacji	Brak dominacji	Brak efektu	Ujemny
Zanieczyszczenia	Brak dominacji	Brak 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 zajmujące 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:

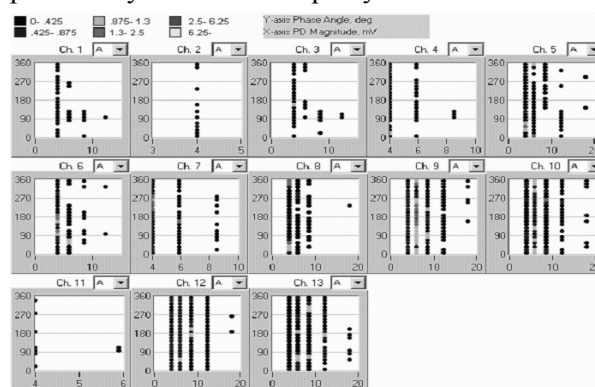
- trendu wraz z wykresem wnz, prądu, temperatury, wilgotności oraz wykresu słupkowego wzajemnych korelacji,
- trendu wnz w oparciu o maksymalne i uśrednione wartości,
- wykresów 3D wyładowań.

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

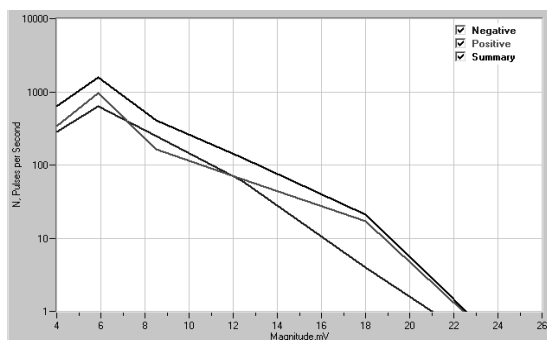


Rys. 6. Wykres w czasie wzajemnych zależności parametrów wnz, temperatury, wilgotności i obciążenia przykładowego silnika elektrycznego, pomiary wykonane przez autora

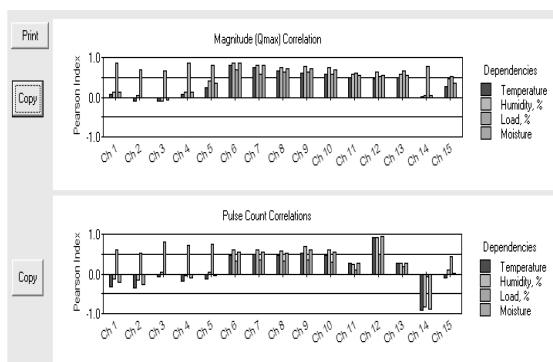
Dzięki czytelnym wykresom słupkowym osoba przeprowadzająca analizę wykonanych pomiarów jest w stanie w prosty sposób dokonać oceny stopnia zależności zmierzonych wielkości. Ponadto ma ona możliwość podglądu, w jakim stopniu zmieniające się czynniki zewnętrzne (temperatura itp.) wpływają na poziom wyładowań niezupełnych.



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



Rys. 8. Intensywność i amplituda wyładowań dodatnich i ujemnych na wykresie 2-D, dla jednego z kanałów pomiarowych



Rys. 9. Wykres słupkowy korelacji wzajemnych parametrów wznz temperatury, wilgotności i obciążenia przykładowego silnika elektrycznego, pomiary wykonane przez autora

4. Uwagi końcowe

Charakter wznz towarzyszących pracy silników elektrycznych jest bardzo złożony. Pomiary on-line wymagają specjalistycznych czujników wznz oraz aparatury analizującej sygnały wznz. Analiza sygnałów dla celów diagnostycznych powinna być prowadzona z uwzględnieniem rozkładów fazowo-rozdzielczych oraz wzajemnych korelacji pomiędzy wznz oraz obciążeniem, temperaturą i wilgotnością. W miarę upływu czasu eksploatacji silników, obserwuje się zmianę intensywności wznz przy charakterystycznych rozkładach fazowo-rozdzielczych i przy charakterystycznych rodzajach korelacji. Konieczne są dalsze badania w tym zakresie.

5. Literatura

- [1]. ADWEL: *PD monitoring*. Nota Aplikac. 2003.
- [2]. BENDAT J., PIERSOL A.: *Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 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.
45-951 Opole ul. Luboszycka 7.
s.szymaniec@po.opole.pl