

Sławomir Szymaniec
Politechnika Opolska, Opole

MONITORING STANU IZOLACJI UZWOJEŃ MASZYN ELEKTRYCZNYCH W PRZEMYSŁE – PRZYKŁAD APLIKACJI CZEŚĆ II

MONITORING OF CONDITION OF WINDING INSULATIONS IN ELECTRICAL MACHINES IN THE INDUSTRY – AN EXAMPLE APPLICATION PART II

Streszczenie: Pracy maszyn elektrycznych towarzyszą wyładowania niepełne. Charakter wnz jest bardzo złożony. W miarę upływu czasu eksploatacji maszyn, obserwuje się zmianę intensywności wnz przy charakterystycznych rozkładach fazowo-rozdzielczych. Diagnostykę można prowadzić w oparciu o wszystkie dostępne czujniki wnz. 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.

Abstract: Operation of electric machines is accompanied by partial discharges. Partial discharges have a very complex nature. Together with progressing use of machines, there is a change in the intensity of partial discharges with typical phase-resolved distributions. The diagnostics can be carried out using available partial charge detectors. Results of measurements of partial discharges in motors depend on: the condition of their insulation, motor load, temperature of windings, humidity, level of external interference, and characteristics of partial discharge detectors and partial discharge analysing devices.

Słowa kluczowe: diagnostyka izolacji uzwojeń wysokonapięciowych maszyn elektrycznych

Keywords: insulation diagnostics of the high voltage electric machines

1. Monitoring stanu izolacji

Maszyny o znaczeniu krytycznym coraz częściej objęte są monitorowaniem [1÷17]. W ocenie własnej wyróżnić można kilka rodzajów monitorowania. Podział zasadniczy układów monitorujących sprowadza się do wyróżnienia [4]: układów monitorowania zabezpieczającego i układów monitorowania predykcyjnego.

Układy monitorowania zabezpieczającego [4] umożliwiają natychmiastowe rozpoznanie niekorzystnej zmiany stanu technicznego maszyny i wymuszają stosowną reakcję „obronną” np. typu wyłączenie. Niekorzystna zmiana stanu technicznego maszyny dotyczy zarówno możliwych zagrożeń dla obsługi technicznej, jak również zagrożeń dla cyklu produkcyjnego. Monitorowanie zabezpieczające bazuje na czujnikach pomiarowych zainstalowanych na stałe. Realizacja procedury pomiarowej polega na ciągłym, bieżącym porównywaniu poziomu wielkości mierzonych, a charakteryzujących stan techniczny maszyny z ustalonymi poziomami progowymi. Przekroczenie poziomu progowego najczęściej uruchamia sygnalizację alarmową i powoduje wyłączenie maszyny. W celu uniknięcia przypadkowych wyłączeń

spowodowanych zakłóceniami stosowana jest swoista organizacja logiczna, która sprowadza się do wymogu przekroczenia co najmniej przez dwie wielkości pomiarowe swoich wartości progowych, by uruchomić program wyłączenia maszyny z ruchu.

Układy monitorowania predykcyjnego [4] prowadzą szczegółową analizę dostępnych sygnałów w celu uzyskania możliwie wczesnego ostrzeżenia o niewielkich nawet zmianach stanu technicznego maszyny. Monitorowanie predykcyjne zawiera proces przewidywania na podstawie analizy trendów oraz szczegółową ocenę elementów składowych analizy sygnałów w dziedzinie czasu i częstotliwości. Dla pełnej oceny stanu technicznego maszyny należy uwzględnić wpływ zmiennych charakteryzujących proces produkcyjny.

Monitorowanie zabezpieczające wymaga pomiarów i porównań dokonywanych bez przerw, dla zapewnienia szybkiej reakcji, niezbędnej dla zapewnienia bezpieczeństwa obsłudze technicznej i maszynie [4]. Monitorowanie predykcyjne wymaga czasu dla szczegółowej analizy złożonych charakterystyk, jest wykony-

wane okresowo co pewien czas. Monitorowanie predykcyjne może być realizowane w trybie ciągłym przy użyciu czujników zainstalowanych na stałe, albo w trybie okresowym, przy pomocy urządzeń przenośnych [4]. Najnowsze układy monitorujące łączą w sobie cechy układów zabezpieczających i predykcyjnych.

Pomiary diagnostyczne w ramach monitorowania ciągłego muszą być wykonywane wystarczająco często, aby umożliwić niezawodne wykrycie potencjalnie niebezpiecznych zmian stanu maszyny w czasie eksploatacji. Wymóg zminimalizowania zagrożenia obsługi i maszyn narzuca żądanie wobec szybkości reakcji urządzeń monitorujących na zmiany stanu maszyny [4]. W ocenie własnej, w przemysłowych rozwiązaniach urządzeń monitorujących ciągle silniki elektryczne, urządzenia te są w stanie reagować na zmiany w czasie 0.1 sekundy przy pomiarach drgań (COMPASS) i teoretycznie nieco ponad sekundę przy pomiarach wnz (ADWEL, IRIS, CUTLER-HAMMER, VIBROCENTER). Przy pomiarach wnz ze względu na wielokanałowość oraz konieczność sprawdzania na bieżąco poziomu zakłóceń, czas wydłuża się do kilku minut. Jediną różnicą między monitorowaniem ciągłym i okresowym jest odstęp czasowy między kolejnymi pomiarami. Monitorowanie okresowe opiera się najczęściej na pomiarach wartości ogólnych uzupełnionych analizą sygnałów w dziedzinie czasu i częstotliwości oraz analizą trendów dla prognozowania rozwoju uszkodzeń, wzbogaconych informacjami o parametrach procesu produkcyjnego [4]. Odstępy czasu między kolejnymi pomiarami okresowymi wynikają z trybu pozyskiwania danych, liczby, rodzaju i złożoności porównań, liczby kanałów pomiarowych. Monitorowanie okresowe przy małych odstępach czasu między kolejnymi pomiarami wykonują urządzenia do monitorowania ciągłego odpowiednio zaprogramowane. Przy stosunkowo długich okresach pomiędzy pomiarami wykonuje je obsługa techniczna korzystając najczęściej z tzw.: Zbieraczy Danych [4, 15, 16]. Są to przenośne małe urządzenia do zapamiętania wyników pomiarów. Wymagają wcześniej ustalenia trasy pomiarowej i wpisania jej z poziomu komputera jako tzw. ścieżki pomiarowej. Po wykonaniu pomiarów ma miejsce transmisja danych do komputera i procedura diagnozowania podobna jak przy monitorowaniu ciągłym.

Autor miał możliwość zapoznania się osobiście z najbardziej rozpowszechnionymi na świecie

systemami monitoringu stanu izolacji silników elektrycznych. Są to wyroby amerykańskiej firmy CUTLER-HAMMER, dwóch kanadyjskich firm ADWEL i IRIS oraz rosyjskiej firmy VIBROCENTER. Zdaniem autora są to bardzo dobre jakościowo systemy monitorujące, które w liczbie znacznie ponad tysiąc pracują w najbardziej odpowiedzialnych napędach; przemyśle energetycznym, przemyśle petrochemicznym, chemicznym, hutniczym, samochodowym, górniczym. Wymienione wyżej firmy są czołowymi światowymi producentami aparatury do diagnostyki maszyn elektrycznych i pionierami we wprowadzaniu pomiarów wyładowań niezupełnych do oceny stanu izolacji generatorów i silników. Urządzenia do monitoringu stanu izolacji silników tych firm opierają się na wykorzystaniu pomiarów wnz generowanych przez układy izolacyjne silników. W ocenie własnej doświadczenia zdobyte przez zespoły badawcze przy opracowywaniu systemów oceny stanu izolacji generatorów oraz hydrogeneratorów po pewnych modyfikacjach zostały przeniesione na systemy oceny stanu izolacji silników. W zasadzie systemy te są podobne. Układy monitorujące stan izolacji silników można podzielić na:

1. Układy do monitoringu ciągłego.
2. Układy do monitoringu okresowego.

W przypadku monitoringu ciągłego urządzenie w całości łącznie z czujnikami jest zainstalowane na stałe na silniku. Przy monitoringu okresowym czujniki zainstalowane są na stałe, a urządzenie analizujące jest przenośne.

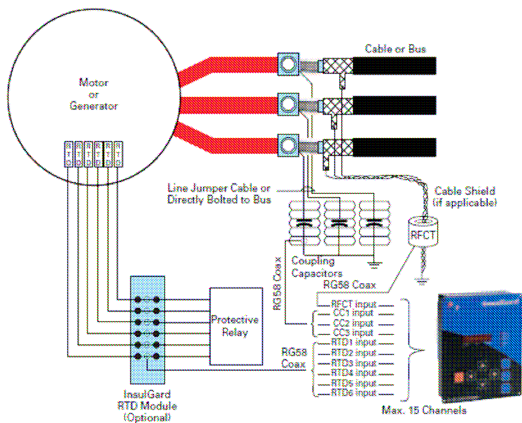
2. Przykład monitoringu w przemyśle

Na rys.1 przedstawiono napęd krytyczny o mocy 7 MW w jednym z zakładów branży samo-



Rys. 1. System InsulGard firmy CUTLER-HAMMER do monitoringu stanu izolacji uzwojeń silników elektrycznych

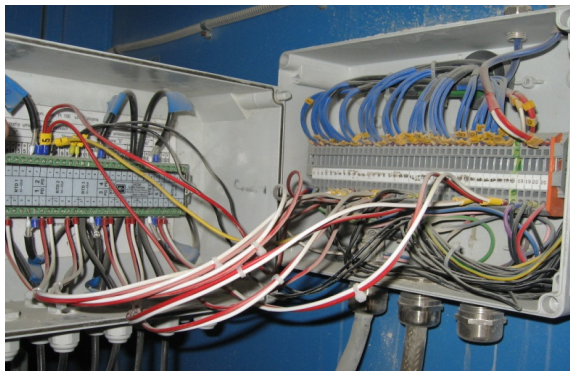
chodowej z zainstalowanym systemem InsulGard firmy CUTLER-HAMMER do monitoringu stanu izolacji uzwojeń silników elektrycznych. W uproszczeniu schemat blokowy układu InsulGard firmy CUTLER-HAMMER do monitoringu ciągłego przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Uproszczony schemat blokowy układu InsulGard firmy CUTLER-HAMMER do monitoringu ciągłego stanu izolacji uzwojeń [9]

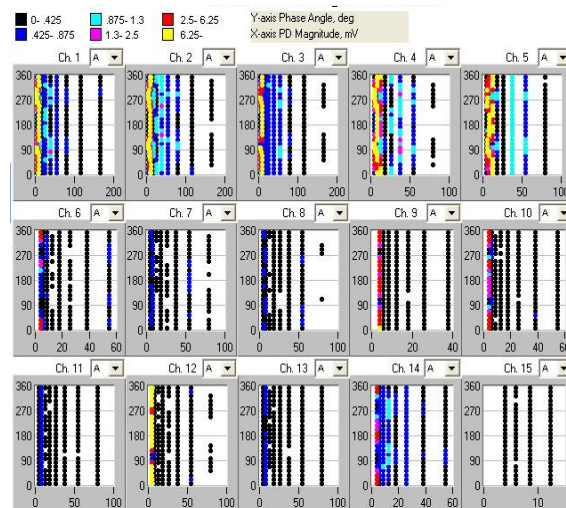


Rys. 3. Skrzynka zewnętrzna układu InsulGard do pomiarów wnz firmy CUTLER-HAMMER



Rys. 4. Skrzynka wyprowadzeń termorezystorów RTD układu InsulGard do pomiarów wnz firmy CUTLER-HAMMER

Rys. 3 i 4 przedstawia skrzynkę zewnętrzną oraz skrzynkę wyprowadzeń termorezystorów układu InsulGard firmy CUTLER-HAMMER do monitoringu stanu izolacji uzwojeń. Czujnikami wnz są: 3 kondensatory sprzęgające bezindukcyjne, bezwyładowaniowe w opcji 500 pF, 6 termorezystorów RTD, 3 cewki Rogowskiego, czujniki HFCT, RFCT, SSC. Prąd silnika jest mierzony cewką Rogowskiego, równocześnie mierzona jest temperatura uzwojeń silnika oraz wilgotność względna. Pomiary mogą być wykonywane w zasadzie w dowolnej opcji czasowej poczynając od okresu co 5 sekund. Wielkościami mierzonymi są: n , q , φ , Q_m , PDI , $NQN+$, $NQN-$ [16, 17]. Oprogramowanie umożliwia wizualizację wyników w opcji: wartości maksymalne, uśrednione, minutowe, godzinowe, dobowe, tygodniowe, za różne czasookresy pracy, w jednostkach bezwzględnych i względnych. Istnieje możliwość liczenia współczynników korelacji. Podstawą jednostką dla Q_m są mV i V. Jeżeli tory pomiarowe są wcześniej wykalibrowane (przypadek bardzo rzadki), wtedy Q_m można wyrażać w jednostkach ładunku. Ograniczenie wpływu zakłóceń jest podobne jak we wspomnianym systemie PDA. Istnieje możliwość dodatkowego wykorzystania kanału szumowego, co umożliwia us-



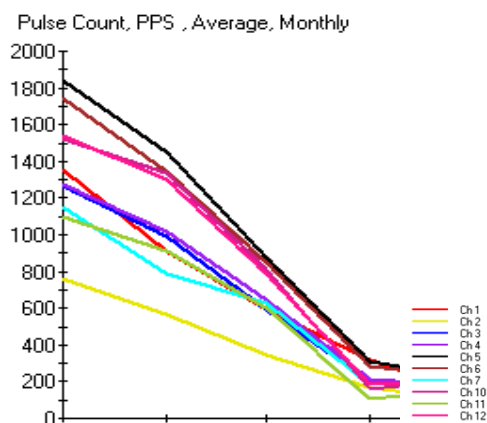
Rys. 5. Przykładowe rozkłady fazowo-rozdzielcze pomiarów wnz dla napędu krytycznego z rys.1

tawienia wartości progowych poziomu sygnału uznanego za użyteczny. Urządzenie posiada możliwość podania na układ przekaźnikowo – stycznikowy informacji o przekroczeniu progów alarmowych dla Q_m , PDI i trendu. Progi alarmowe ustawia z poziomu komputera ekipa

instalująca urządzenie. W trakcie eksploatacji silnika istnieje możliwość zmiany poziomów progów, jeżeli posiada się odpowiednie uprawnienia.

Rys.5. przedstawia przykładowe rozkłady fazowo - rozdzielcze pomiarów wnz dla napędu krytycznego, Natomiast rys.6 ilustruje wykresy trendu PPS na poszczególnych kanałach dla uśredniania miesięcznego. Z pomiarów wykonanych w czasie 6 lat wynikają następujące najważniejsze wnioski:

- przy obserwowanym ciągłym wzroście aktywności wnz pojawia się anomalia polegająca na gwałtownym obniżeniu się aktywności i nie jest to spowodowane warunkami pracy. W ocenie firmy *CUTLER-HAMMER* taka sytuacja jest alarmowa i wymaga natychmiastowego wyjaśnienia. Należy dokonać przeglądu silnika i aparatury monitorującej stan izolacji, zwłaszcza sprawdzić czujniki wnz -(rys.7),
- częstotliwość impulsów wnz w funkcji amplitudy wyładowań odniesiona do impulsów o polaryzacji dodatniej i ujemnej z uwzględnieniem zmian obciążenia świadczy o luźnych uzwojeniach silnika -(rys.8),
- wobec takich wniosków diagnostycznych kierownictwo firmy zaplanowało przerwę produkcyjną oraz okres przeglądów i remontów,
- przegląd silnika potwierdził luźne uzwojenia.

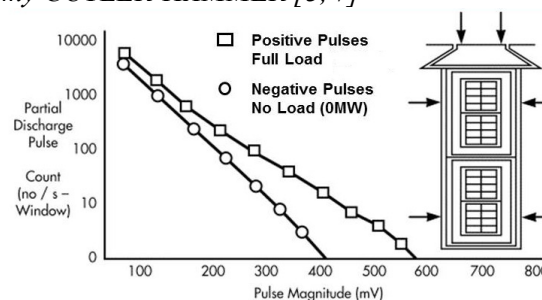


Rys. 6. Wykresy trendu PPS na poszczególnych kanałach dla uśredniania miesięcznego

Na rys. 7 przedstawiono krzywą życia układu izolacyjnego dla przykładowej maszyny elektrycznej według firmy *CUTLER-HAMMER* [118].



Rys. 7. Krzywa życia układu izolacyjnego dla przykładowej maszyny elektrycznej według firmy *CUTLER-HAMMER* [3, 7]

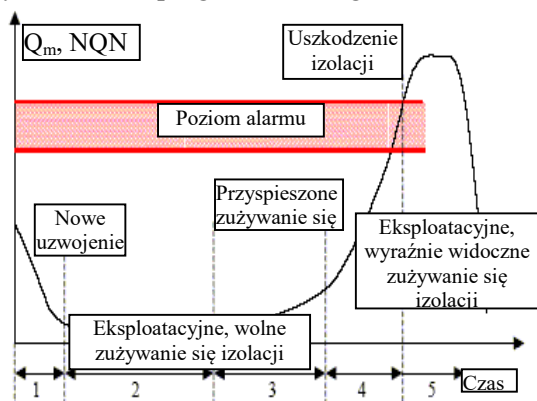


Rys. 8. Częstotliwość impulsów wnz w funkcji amplitudy wyładowań dla przykładowej maszyny elektrycznej z luźnym uzwojeniem [1]

Na rys. 9 przedstawiono krzywą życia układu izolacyjnego dla przykładowej maszyny elektrycznej wg firmy *IRIS* [5]. W opinii autora artykułu filozofia postępowania tej firmy jest inna. *IRIS* postępuje w ocenie własnej w diagnozowaniu bardzo ostrożnie. Firma ta proponuje przy monitoringu stanu izolacji maszyn elektrycznych ustawić progi alarmowe dla wielkości pomiarowych NQN i Q_m [16, 17]. Progi te ustala się w oparciu o pierwsze pomiary na danej maszynie oraz w oparciu o swoją bazę danych lub bazę firmy. Baza danych firmy powstaje sukcesywnie od 1992 roku i w roku 2000 [5] liczyła 28563 pomiarów z testów na maszynach elektrycznych (turbogeneratory – 33%, hydrogeneratory – 49% i silniki – 18%). Spośród znacznie większej liczby testów, były brane pod uwagę tylko te testy, gdy maszyna pracowała przy normalnych temperaturach

w warunkach pełnego obciążenia lub przy obciążeniu niewiele mniejszym. Testy, do których były jakieś wątpliwości odrzucano. Wyniki testów pogrupowano w zależności od napięcia znamionowego maszyn, sposobu ich chłodzenia oraz w zależności od rodzaju czujnika używanego do pomiarów wnz. Następnie wyniki ana-

lizowano ze względu na to, jakie wartości NQN oraz Q_m są reprezentatywne kolejno dla populacji - 25%, 50%, 75% i 90% maszyn. Ustalono w ten sposób progi 25%, 50%, 75% i 90% -we. W wyniku długoletnich badań zaproponowano, aby ustawienie progów alarmowego dla wartości



Rys. 9. Przykładowa krzywa życia układu izolacyjnego maszyny elektrycznej według firmy IRIS [5]

np. Q_m danego silnika polegało na wyborze wartości Q_m reprezentującej próg wyższy od wartości wstępnej. Przykładowo, dla silnika o napięciu znamionowym 6 kV zmierzono po jego uruchomieniu Q_m przy użyciu kondensatora 80 pF i stwierdzono że $Q_m=48\text{mV}$. W oparciu o bazę danych firmy porównuje się wynik bieżący z wartościami progowymi i zakwalifikuje wynik do grupy: wartości dla 75% maszyn [5]. Wartość progów alarmowych wybiera się z progów wyższego, to znaczy dla grupy 90%. Z bazy danych wynika, że próg ten wynosi 287 mV [5]. Ustawia się więc próg alarmowy dla $Q_m=287\text{ mV}$. Oznacza to że po przekroczeniu przez Q_m wartości 287 mV można się spodziewać problemów z izolacją silnika. Z wieloletnich doświadczeń firmy IRIS wynika, że progi alarmowe nie zależą od mocy maszyny tylko od jej klasy napięciowej, rodzaju chłodzenia i typu czujnika wnz [5]. Zalecaną formą interpretacji bieżącej wyników zwłaszcza przy wątpliwościach są konsultacje z ekspertami za pośrednictwem Internetu.

3. Uwagi i wnioski końcowe

Pracy silników elektrycznych towarzyszą wyładowania niezupełne. Sekwencje impulsów wnz są zdarzeniami losowymi, charakteryzującymi się znacznym rozrzutem wielkości amplitudowych i fazowych. Można je scharakteryzować przy pomocy wielkości takich jak; n , q , φ , Q_{max} (Q_m), PDI , $NQN+$, $NQN-$ [16, 17]. Są to wiel-

kości opisujące intensywność wnz, częstotliwość występowania wnz oraz kąt fazowy – rozkłady fazowo-rozdzielcze.

Charakter wnz towarzyszących pracy silników elektrycznych jest bardzo złożony. Pomiary on-line wymagają specjalistycznych czujników wnz oraz aparatury analizującej sygnały wnz. Analiza sygnałów dla celów diagnostycznych powinna być prowadzona z uwzględnieniem rozkładów fazowo-rozdzielczych. W miarę upływu czasu eksploatacji silników, obserwuje się zmianę intensywności wnz przy charakterystycznych rozkładach fazowo-rozdzielczych. Zmiany intensywności wnz przedstawione w charakterystykach typu trend, zmiany charakterystyk fazowo-rozdzielczych mogą być wykorzystane do diagnostyki on-line stanu izolacji silników.

Wyniki pomiarów wnz silników zależą od: stanu izolacji uzwojeń, stopnia degradacji, obciążenia silnika, temperatury uzwojeń, wilgotności, poziomu zakłóceń zewnętrznych oraz od charakterystyki czujników wnz i aparatury analizującej wnz.

Sprawą najważniejszą przy monitoringu stanu izolacji silników jest śledzenie na bieżąco trendu zmian wielkości mierzonych w szczególności: Q_m , NQN , PDI , rozkładów fazowo-rozdzielczych. Ustawienie wartości progów alarmowych powinno się odbyć w oparciu o bazę wiedzy własnej lub producenta aparatury diagnostycznej. Jeżeli zostanie zauważony gwałtowny wzrost wielkości mierzonych, np.: 2-3-krotny wzrost w okresie miesiąca, intensywny wzrost eksponencjalny, to silnik należy zatrzymać. Trzeba przeprowadzić dokładny jego przegląd, połączony z czynnościami konserwacyjno – serwisowymi a nawet remontowymi. Przed uruchomieniem silnika należy go sprawdzić, wykonując pomiary stanu izolacji off-line. Korzystnie, gdy będą to również pomiary wnz. Jeżeli wykonane zabiegi nie poprawią w sposób satysfakcjonujący stanu izolacji, konieczny jest pełny remont uzwojenia. Autor uważa, że eksploatowany silnik należy natychmiast zatrzymać, gdy w trakcie monitoringu stanu izolacji, przy obserwowanym ciągłym intensywnym wzroście aktywności wnz pojawia się anomalia polegająca na gwałtownym obniżeniu tej aktywności i nie jest to spowodowane warunkami pracy. W ocenie własnej taka sytuacja jest alarmowa i wymaga natychmiastowego wyjaśnienia. Należy dokonać przeglądu silnika oraz aparatury monitorującej stan izolacji. Pomiar

wnz on-line silników oraz monitoring stanu izolacji ułatwia racjonalną ich eksploatację w odniesieniu do układu izolacyjnego. Zmiana wielkości charakteryzujących wnz obok informacji o stanie izolacji, o pogłębiającym się zużyciu izolacji uzwojenia silnika, dostarcza dodatkowych informacji np. o ewentualnym zabrudzeniu uzwojenia silnika. Stwarza to możliwość prowadzenia właściwych działań serwisowych wobec silników. Autor na podstawie swoich dotychczasowych doświadczeń uważa, że monitoring stanu izolacji silników elektrycznych podobnie, jak i innych maszyn elektrycznych w warunkach przemysłu krajowego jest celowy i technicznie możliwy. Monitoring można prowadzić w oparciu o wszystkie dostępne czujniki wnz. W ocenie autora najprościej w oparciu o najbardziej rozpowszechnione w maszynach elektrycznych i najtańsze czujniki – termorezystory, służące do pomiarów temperatury uzwojeń. Należy je dodatkowo wyposażyć w zespoły antenowe, przez co stają się czujnikami wnz typu antena na zakres MHz - owy.

Literatura

- [1]. ADWEL: *PD monitoring*. Nota Aplikacyjna 2003.
- [2]. Bertenshaw D., Sasic M.: *On-line Partial Discharge Monitoring on MV motors-Casestudies 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]. Brüel & Kjær *Condition Monitoring Systems Division: Compass Application notes BP 1053-13*.
- [5]. Fenger M., Stone G.C., Lloyd B.: *Continuous on-line PD monitoring for motors, switchgear and dry-type transformers*. Iris Power Engineering, Toronto, ON-M9C1B2, Nota Aplikacyjna 2003.
- [6]. Florkowska B, Florkowski M., Włodek R., Zydrón P.: *Mechanizmy, pomiary i analiza wylądowań niepełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia*. Wyd. IPPT PAN, Warszawa 2001.
- [7]. 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.
- [8]. Gulski E.: *Diagnozowanie wylądowań niepełnych w urządzeniach wysokiego napięcia w eksploatacji*. Wyd. Polit. Warszawskiej, Warszawa 2003.
- [9]. *Instrukcja systemu monitorującego wnz InsulGard firmy Cutler-Hammer 2007*.
- [10]. Kacperak M.: *Diagnostyka eksploatacyjna napędów elektrycznych w przemyśle cementowym na przykładzie Cementowni ODRA S.A.* Rozprawa doktorska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Politechnika Opolska, Opole, 2012.
- [11]. Kandora W.: *Diagnostyka off-line izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych wykonanych w technologii Resin – Rich*. Rozprawa doktorska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Politechnika Opolska, Opole, 2012.
- [12]. PN-EN 60270. *Wysokonapięciowa technika probiercza. Pomiary wylądowań niepełnych*.
- [13]. Sasic M., Bertenshaw D.: *On-line Partial Discharge Monitoring on MV Motors –Case Studies on Improved Sensitivity Couplers and Interpretation Methods*, SDEMPED, ITALY 1-3 Sept. 2001 pp.1-5.
- [14]. Sasic M.: *Partial discharge measurement on rotating machines*. 9th National Congress of Electric Rotating Machinery September 29 to October 2, 1999, Veracruz, Mexico.
- [15]. Stone G.C., Boulter E.A., Culbert I., Dhirani H.: *Electrical insulation for rotating machines*. IEEE PRESS series on Power Engineering, USA, 2004.
- [16]. 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.
- [17]. Szymaniec S.: *Badania, eksploatacja i diagnostyka zespołów maszynowych z silnikami indukcyjnymi klatkowymi*. Wyd. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej 2013, Opole, Studia i Monografie, zeszyt 333.

Autor

prof. dr hab. inż. Sławomir Szymaniec
 Politechnika Opolska. Wydział Elektrotechniki,
 Automatyki i Informatyki
 Katedra Elektrowni i Systemów Pomiarowych
 45-758 Opole ul. Prószkowska 76, bud. 1
 s.szymaniec@po.opole.pl