

Sławomir Szymaniec
Politechnika Opolska, Opole

MONITORING STANU IZOLACJI UZWOJEŃ MASZYN ELEKTRYCZNYCH W PRZEMYSŁE – PRZYKŁAD APLIKACJI CZĘŚĆ I

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

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. Wstęp

Wyniki badań stanu izolacji uzwojeń silników decydują o dopuszczeniu silnika do eksploatacji, warunkują jego bezpieczną eksploatację. Badania izolacji uzwojeń silników prowadzone w oparciu o wykorzystanie najnowszej aparatury diagnostycznej w ocenie własnej należą do najtrudniejszych, najdłużej trwających i najbardziej kosztownych. Badania stanu izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych i możliwości wczesnego ostrzeżenia o jego ewentualnym pogarszaniu się mają duże znaczenie praktyczne dla prawidłowej eksploatacji maszyn. Wiąże się to z dużymi kosztami przewijania stojanów silników WN. Stosowane obecnie układy izolacyjne są bardzo dobrej jakości, odporne na zawilgocenie, szkodliwe wpływy atmosferyczne, jak również posiadają dobrą wytrzymałość mechaniczną, dobrze znoszą drgania, na które mogą być narażone połączenia czołowe uzwojeń. Coraz większe rozpowszechnianie się układów przekształtnikowych do zasilania maszyn, stosowanie szybkich wyłączników, jak również częste rozruchy silników przy bezpośrednim załączeniu na napięcie znamionowe powodują, że izolacja uzwojeń może być naprężana za-

równoleżnikowo jak i mechanicznie, przy czym wywołane nimi uszkodzenia mogą mieć charakter zmęczeniowy. W ostatnim 60-leciu w krajach najbardziej uprzemysłowionych daje się zauważyć tendencja do wykorzystywania coraz częściej sygnału wyładowań niepełnych – wnz, z ang. Partial Discharges – PD [18, 19] towarzyszących pracy maszyn elektrycznych do oceny stanu izolacji ich uzwojeń. PD są odpowiedzialne za:

- wyładowania w żłobkach,
- rozwarstwienie,
- szczeliny,
- luzy uzwojenia,
- wyładowania na czołach uzwojenia.

Termiczne, mechaniczne, elektryczne i chemiczne czynniki prowadzą do starzenia się izolacji uzwojeń. Intensywność starzenia i efekty takiego starzenia mogą być oceniane przez monitorowanie PD. Starzenie prowadzi do pogorszenia się właściwości elektrycznych, a nawet może być przyczyną uszkodzenia uzwojenia. Początkowo do pomiarów sygnałów PD używano oscyloskopów. Technika ta wymagała bardzo dużego doświadczenia. Najtrudniejszym zaga-

dnieniem przy pomiarach wnz maszyn elektrycznych jest wpływ zakłóceń na wyniki pomiaru. Zakłócenia mogą pochodzić z różnych źródeł (sprzężenia galwaniczne, elektromagnetyczne, charakter zasilania) [1÷21]. Wpływ zakłóceń jest szczególnie istotny, gdy pomiary odbywają się w warunkach przemysłowych gdzie źródeł zakłóceń jest bardzo wiele, a poziom zakłóceń jest duży.

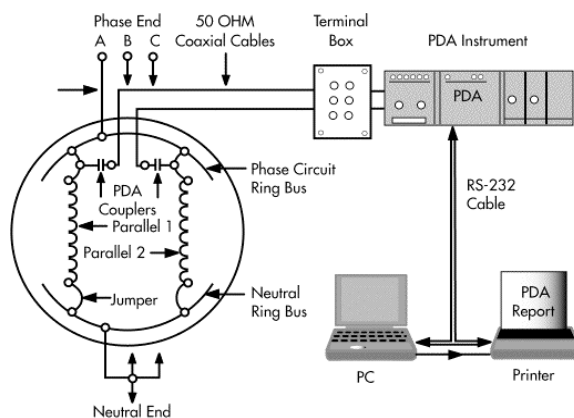
Pomiary wnz maszyn elektrycznych w warunkach przemysłowych, a więc w warunkach o wysokim poziomie zakłóceń wymagają opracowania metod pomiaru pozwalających na oddzielenie sygnałów wnz od zakłóceń i szumów. Zagadnienie metod eliminacji zakłóceń przy pomiarach wnz jest przedstawione w literaturze [1, 8, 18, 19, 21]. Metody ograniczenia wpływu zakłóceń na wyniki pomiarów wnz weryfikowano praktycznie. Do najczęściej stosowanych metod ograniczenia wpływu zakłóceń w pomiarach wnz należą [18, 19, 21]:

- właściwe kształtowanie środowiska pomiarowego,
- pomiary w układzie mostkowym,
- wstępna analogowa filtracja sygnału mierzonego,
- dyskryminacja poziomu i biegunowości impulsów,
- selekcja impulsów metodą okna czasowego,
- eliminacja zakłóceń metodą okna czasowego,
- zastosowanie techniki określania kierunku propagacji sygnału,
- cyfrowe przetwarzanie sygnałów.

Badania diagnostyczne stanu izolacji on-line maszyn elektrycznych wprowadzono w latach pięćdziesiątych ubiegłego wieku [18]. Były to badania wnz generatorów. Pierwsza metoda polegała na pomiarze wnz w przewodzie łączącym punkt neutralny uzwojenia stojana generatora z ziemią. Do pomiarów wykorzystano przekładniki prądowe wysokiej częstotliwości HFCT (High Frequency Current Transformer) różnych rodzajów w tym RFCT (Radio Frequency Current Transformer) [18]. Metoda okazała się być mało czuła. W latach późniejszych do pomiarów zaczęto używać kondensatorów sprzęgających przyłączanych do zacisków generatorów. Wykorzystywano mierniki zakłóceń radioelektrycznych oraz oscyloskopy. Wizualizacja sekwencji impulsów wnz obserwowana dla cyklu napięcia pobierczego była przedstawiona na liniowym wykresie podstawy czasu

lub na elipsie. Poważnym problemem dla wiarygodności pomiarów wnz generatorów okazał się wpływ zakłóceń. W ocenie autora prawdziwym przełomem w poprawie użyteczności i wiarygodności badań on-line przy wykorzystaniu pomiarów wnz było: opracowanie w połowie lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku w Ontario-Hydro w Kanadzie dla potrzeb diagnozowania hydrogeneratorów metody i aparatury nazwanej PDA (Partial Discharge Analyzer) [1]. W 1986 FES International (Adwel) stał się pierwszym komercyjnym dostawcą systemu PDA – rys. 1÷7. Metoda polega na pomiarze wnz w układzie różnicowym, w którym eliminowane są zakłócenia. Czujnikami są kondensatory pomiarowe bezwładowaniowe PD (80, 500 lub 1000pF).

W ocenie autora należy tu wymienić przede wszystkim rozwiązania techniczne pionierów: firmy Adwel, Catler-Hammer, Iris. Początkowo przedmiotem zainteresowania tych firm były generatory i hydrogeneratory, a dopiero później silniki WN dużej mocy. Autor stwierdza, że aparatura do diagnostyki stanu izolacji silników elektrycznych on-line jest w zakładach przemysłowych w krajach zachodnich instalowana. Liczba zainstalowanych systemów systematycznie się zwiększa i szacowana jest na tysiące. W kraju znanych jest autorowi już kilkadziesiąt przypadków zainstalowania przez właścicieli zakładów systemów do oceny stanu izolacji on-line silników na stałe w napędach, o krytycznym znaczeniu dla procesu produkcji.

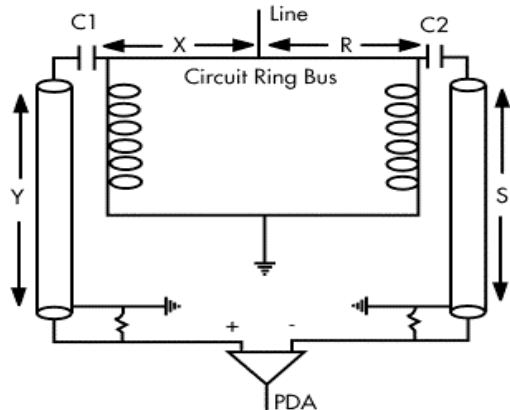


Rys. 1. Standardowa instalacja różnicowa PDA

Zasady montażu czujników pojemnościowych są ściśle określone [1] rys. 2÷5. Metoda ta jest stosowana z powodzeniem w pomiarach wnz maszyn elektrycznych do chwili obecnej.

2. Mobilne analizatory wnz

W ostatnim czasie do dyspozycji diagnostów stanu izolacji uzwojeń firmy produkujące aparaturę diagnostyczną oddają wielokanałowe, przenośne analizatory przeznaczone do rejestra-



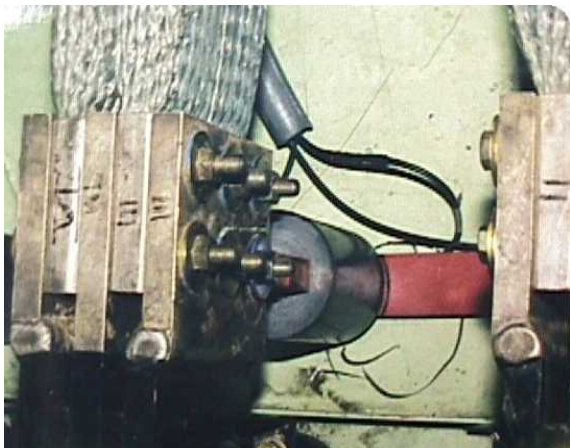
Dostosowanie długości przewodów sygnałowych, takich jak:

$$X + Y/0.65 = R + S/0.65, \text{ gdzie}$$

X i R = długość obwodu szynowego,

Y i S = długość kabla koncentrycznego.

Rys. 2. Wytyczne montażu czujników



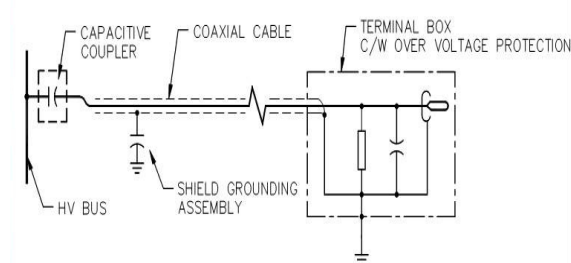
Rys. 3. Przykładowy montaż czujników pojemnościowych w silniku



Rys. 4. Czujniki pojemnościowe do pomiarów wnz

cji i analizy wyładowań niepełnych w układach izolacyjnych maszyn wysokiego napięcia.

W ocenie autora jest to „nowa jakość” w diagnostyce izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych. Przykładem takiego urządzenia jest przenośny analizator R2200 rosyjskiej firmy Dimrus [4, 5, 9] – rys. 8. Autor dysponuje tym analizatorem. Wyróżniającą cechą analizatora jest wbudowany system ekspercki o nazwie PD-



Rys. 5. Układ do pomiarów wnz dla jednej fazy silnika



Rys. 6. Aparatura stacjonarna PDA



Rys. 7. Aparatura przenośna PDA

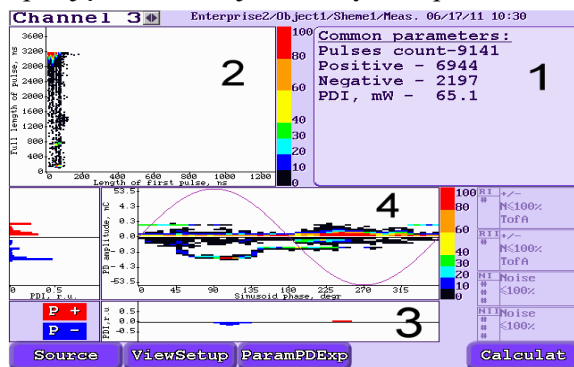


Rys. 8. Widok zewnętrzny przenośnego analizatora R2200

Expert. Umożliwia on na podstawie bazy defektów, udostępnionej dzięki producentowi i wzbogacanej na bieżąco przez użytkownika, określać przyczynę powstania uszkodzenia [4, 5, 9]. Urządzenie to można wykorzystywać w dwóch trybach pracy, podczas pomiarów okresowych oraz jako tymczasowy stacjonarny monitoring badanego obiektu. Badanie impulsów wnz w analizatorze odbywa się w oparciu o algorytmy diagnostyczne. Ich realizacja przebiega w czasie rzeczywistym. Podstawowe algorytmy to [4]:

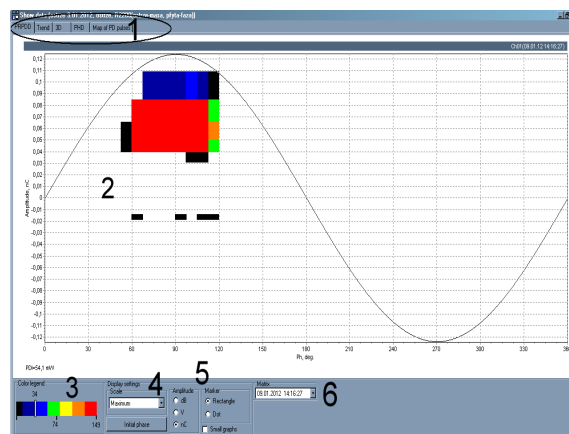
- analiza własności częstotliwościowych rejestrowanych impulsów wnz,
- analiza kształtu impulsów,
- porównanie synchroniczne wartości amplitud pomiędzy głównym kanałem rejestrującym, a innymi kanałami,
- analiza opóźnień pomiędzy impulsami wchodzącymi w kanał analizowanym w stosunku do impulsów rejestrowanych w pozostałych wybranych kanałach,
- porównywanie biegunowości impulsów pomiędzy sąsiednimi kanałami pomiarowymi.

Na wejściu każdego kanału znajduje się filtr, który ma za zadanie wyodrębnić sygnałów z obszaru od 0,5 do 10 MHz, co odpowiada zakresowi pomiarowemu wnz [4]. Użytkownik wybiera ilość kanałów pierwotnych oraz ich funkcje. Na podstawie automatycznych algorytmów i filtrów ustawionych przez użytkownika dokonywana jest selekcja. Prowadzi to do określenia, czy dany impuls powstał w wyniku wnz, czy jest spowodowany szumami. Impulsy zarejestrowane podczas pomiarów analizatorem R2200 zapisywane są w jego pamięci. Na ich podstawie po zakończeniu pomiaru, na ekranie analizatora można uzyskać informacje, takie jak pokazano na rys. 9 [4]. Pod 1 znajdują się dane opisujące ilość zarejestrowanych impulsów do-



Rys. 9. Obraz rozkładu wnz – zrzut ekranu z analizatora R2200 [4]

datnich i ujemnych oraz obliczona moc wyładowań (PDI). Pole 2 to czasowo – częstotściowy rozkład impulsów w skrócie TFM (ang. – Times Freque-ncy Map). Osie współrzędnych tego pola: na oś Y – czas trwania każdego impulsu, oś X – częstotliwość impulsów. Kolorami przedstawiona została ilość impulsów o tych samych parametrach. Pole nr 3 przedstawia rozkład mocy (PDI) w zależności od kąta fazowego. Pod 4 znajduje się amplitudowo – fazowo – częstotliwościowy rozkład impulsów. Oś odciętych to okres napięcia sieci, natomiast na osi rzędnych umieszczone są wartości amplitudy rejestrowanych impulsów. Tłem wykresu na rys. 10 jest umowna sinusoida sieci zasilającej, dzięki której można przypisać moment powstania impulsu wnz. [4]:



Rys. 10. Rozkłady fazowo-rozdzielcze zmierzonych impulsów wnz [4]

3. Własne rozwiązania i konstrukcje

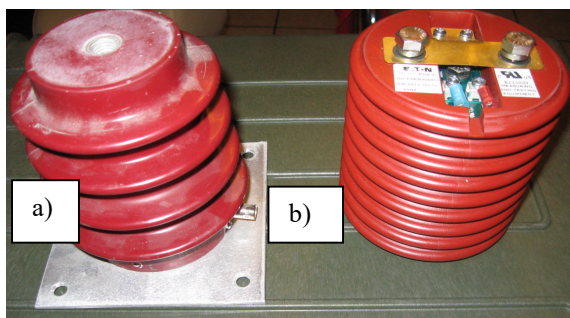
W zespole autora od roku 2000 trwają prace nad opracowaniem metodyki pomiarów wnz, nad własnymi rozwiązaniami czujników do pomiarów wnz, nad konstrukcją sond pomiarowych oraz aparatury pomiarowej w tym nad opracowaniem analizatorów mobilnych wnz. W ciągu 16 lat intensywnych badań opracowano między innymi:

1. Metodykę pomiarów wnz silników w warunkach ich przemysłowej eksploatacji, umożliwiających wykrycie uszkodzeń izolacji uzwojeń. Opracowano i wykonano zespoły antenowe. Czujniki do pomiaru temperatury w silnikach typu termorezystory RTD np. Pt100 wyposażone w zespoły antenowe własnej konstrukcji stają się anteną służącą do pomiarów wnz w zakresie 1÷200 MHz. W zespoły antenowe można wyposażyć dowolne RTD znajdujące się w silniku, jak również zamontować według po-

trzeb dodatkowe RTD w przestrzeniach czoł uzwojeń silników i wyposażyć je we wspomniane zespoły antenowe.

2. Opracowano i wykonano bardzo prosty oraz tani czujnik wnz typu antena. Antenę tworzy; długi przewód ($L \gg d$, L -długość, d -średnica przewodu) poprowadzony wokół czoł uzwojeń silnika. Jest to najprostsza antena odbiorcza w MHz-owym zakresie częstotliwości, dobrana eksperymentalnie, wyposażona we wspomniany już zespół antenowy własnej konstrukcji [19].

3. W ramach realizacji projektu badawczego własnego Nr N N 510536639. Czujniki do pomiarów off-line i on-line wyładowań niezupełnych w silnikach elektrycznych oraz system kalibracji torów pomiarowych, autor wraz z zespołem współpracowników w szczególności z dr inż. Markiem Kacperakiem, dr inż. Wojciechem Kandorą i mgr inż. Piotrem Paduchem podjął temat konstrukcji krajowych czujników do pomiarów wnz. Pan Wojciech Kandora w ramach realizacji pracy doktorskiej [11] zaprojektował i wykonał między innymi kondensatory produkcji własnej do pomiaru wnz WN silników elektrycznych – rys.11. Do głównych



Rys. 11. Kondensatory do pomiaru wnz a) produkcji własnej b) produkcji amerykańskiej

zalet tego typu kondensatorów należą: małe gabaryty, niski współczynnik strat dielektrycznych $\text{tg}\delta < 1\%$, duża wytrzymałość elektryczna. Czujniki zostały przystosowane do współpracy z systemem monitoringu wnz on-line i nie wymagają budowy impedancji sprzęgającej.

4. Z dostępnych komponentów elektronicznych zbudowano przenośny zestaw aparaturowy do pomiarów i analizy wnz w silnikach elektrycznych – rys. 12 [19]. Zestaw aparaturowy może współpracować z dowolnymi czujnikami wnz typu: kondensatory sprzęgające, termorezystory RTD, czujniki RFCT, cewki Rogowskiego tak sztywne jak i elastyczne. Ma możliwość pomiarów temperatury uzwojeń, prądu, wilgotności względnej. System ochrony przed niekorzyst-

ny wpływem zakłóceń zewnętrznych jest podobny jak w analizatorze PDA. Pomiar wnz odbywa się w zakresie od 1÷200 MHz. Synchronizacja pracy zestawu aparaturowego może odbywać się napięciem dostępnym w miejscu pomiarów silnika. Zbudowany zestaw umożliwia również wykonanie pomiarów wnz silników typu off-line.

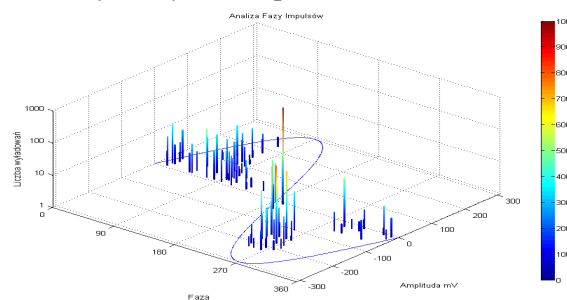


Rys. 12. Przenośny zestaw aparaturowy do pomiarów i analizy wnz w silnikach elektrycznych produkcji własnej

5. Opracowano technikę kalibracji toru pomiarowego przy pomiarach wnz silników elektrycznych w warunkach przemysłowych [19].

6. Opracowano konstrukcje przenośnych sond do pomiarów wnz w WN maszynach elektrycznych [19].

7. Trwają prace nad konstrukcją własnego wielkanałowego mobilnego analizatora wnz. Kolejna wersja poddawana jest próbom przemysłowym. Poniżej przedstawiono rys. 13 z przykładowymi wynikami pomiarów.



Rys. 13. Przykładowe wyniki pomiarów wnz otrzymane na wielokanałowym mobilnym analizatorze wnz produkcji własnej

4. Wnioski

Pracy maszyn elektrycznych towarzyszą wyładowania niezupełne. 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. W trakcie badań własnych autor z zespołem opracował własne konstrukcje czujników i przyrządów służące do pomiarów wnz w maszynach elektrycznych. Proponowane własne rozwiązania 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.

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]. DIMRUS: *Analizator R2200, nota aplikacyjna, dokumentacja 2011*.
- [5]. Fitz D.: *Pomiary wyladowań niezupełnych z zastosowaniem mobilnego analizatora R2200, w warunkach laboratoryjnych*. Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Opole, 2012.
- [6]. Florkowska B, Florkowski M., Włodek R., Zydroń P.: *Mechanizmy, pomiary i analiza wyladowań niezupełnych 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 wyladowań niezupełnych w urządzeniach wysokiego napięcia w eksploatacji*. Wyd. Polit. Warszawskiej, Warszawa 2003.
- [9]. Jaskulski N.: *Analizatory mobilne do pomiaru wyladowań niezupełnych – konstrukcje, parametry, oprogramowanie, zastosowanie i możliwości wykorzystania w przemyśle*. Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Opole, 2013.
- [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]. Plutecki Z.: *Analiza wpływu mikroklimatu na emisję wyladowań niezupełnych maszyn elektrycznych w warunkach przemysłowej eksploatacji*. Studia i Monografie z.325. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2012.
- [13]. Plutecki Z., Szymaniec S.: *Wpływ warunków otoczenia na emisję wyladowań niezupełnych w maszynach elektrycznych*. Przegląd Elektrotechniczny, nr 2b, rok 2013, str. 154-157.
- [14]. Plutecki Z., Szymaniec S.: *An analysis of the influence of microclimate on partial discharge emissions of electric machines in the conditions of industrial operation – own research*. Archives of Electrical Engineering, No 4, 2013., pp.629-648.
- [15]. PN-EN 60270. *Wysokonapięciowa technika probiercza. Pomiary wyladowań niezupełnych*.
- [16]. 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.
- [17]. Sasic M.: *Partial discharge measurement on rotating machines*. 9th National Congress of Electric Rotating Machinery September 29 to October 2, 1999, Veracruz, Mexico.
- [18]. Stone G.C., Boulter E.A., Culbert I., Dhirani H.: *Electrical insulation for rotating machines*. IEEE PRESS series on Power Engineering, USA, 2004.
- [19]. 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.
- [20]. Szymaniec S.: *Badania, eksploatacja i diagnostyka zespołów maszynowych z silnikami indukcyjnymi klatkowymi*. Wyd. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej 2013, Opole, Studia i Monografie, zeszyt 333.
- [21]. Zydroń P.: *Zastosowanie analizy czasowej i częstotliwościowej do badania wyladowań niezupełnych w układach izolacyjnych wysokiego napięcia*. Rozprawa doktorska, AGH Kraków, 2001.

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