

Sławomir Szymaniec
Politechnika Opolska, Opole

WYKORZYSTANIE FAZY SYGNAŁÓW WNZ W DIAGNOSTYCE STANU IZOLACJI UZWOJEŃ SILNIKÓW ELEKTRYCZNYCH

THE USE OF PHASE SIGNALS IN THE PD DIAGNOSTICS OF THE WINDING INSULATION OF ELECTRIC MOTORS

Streszczenie: Typowe uszkodzenia izolacji maszyn elektrycznych znajdują swoje odbicie w sygnale wnz i w charakterystyczny sposób „różnicują go” w zależności od miejsca wystąpienia. W artykule przedstawiono typowe źródła defektów w izolacji maszyn elektrycznych i odpowiadający im schemat zastępczy oraz pewne charakterystyczne cechy sygnałów wnz. Przedstawiono wyniki pomiarów wnz dla przykładowych silników na tle napięcia zasilającego wybranej fazy silników, uznanej za fazę odniesienia. Przedstawiono wyniki pomiarów wnz dla różnego rodzaju uszkodzeń izolacji uzwojeń. Pokazano przydatność fazy sygnałów wnz do diagnostyki stanu izolacji uzwojeń silników elektrycznych.

Abstract: Typical damages to the insulation of electrical machines are reflected in the PD signal and differ it in a very characteristic manner depending on the location. The paper presents typical sources of defects in the insulation of electrical machines and the corresponding equivalent circuit diagram and some characteristic features of PD signals. Results of PD measurements for sample motors are presented in the background of supply voltage of the selected phase of motors, deemed as the reference phase. Results of PD measurements are presented for different types of damages to the winding insulation. The usefulness of phase signals in the PD diagnostics of the winding insulation of electric motors is presented.

Słowa kluczowe: *maszyny elektryczne, izolacja maszyn elektrycznych, sygnał wnz, pomiary wnz*
Keywords: *electrical machines, insulation of electrical machines, PD signal, PD measurements.*

1. Wstęp

Zagadnienia pomiarów wyładowań niezupełnych (wnz) w izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych, w tym układy pomiarowe przedstawiono w literaturze [1÷10].

W literaturze [5, 6] przedstawiony jest pogląd, który podziela autor, że sygnały wnz zmierzone dokładnie na badanej maszynie np. silniku nie muszą być identyczne jak przebiegi rzeczywiste wnz maszyny. W ocenie końcowej izolacji decyduje przede wszystkim trend zmian wnz. Wyeliminowany lub ograniczony w możliwie największym stopniu powinien być natomiast wpływ zakłóceń na wynik pomiaru. Należy przeprowadzić metrologiczne oszacowanie poziomu zakłóceń. Ważne jest z punktu widzenia diagnostyki stanu izolacji uzwojeń, aby właściwie rozpoznać miejsce emisji wyładowań wnz, co jak się później okaże ma ścisły związek z tzw. fazą sygnałów wnz, a dokładniej z wykresami fazowo-rozdzielczymi [1, 2, 3].

W ośrodkach naukowo-badawczych zajmujących się izolacją maszyn elektrycznych przede wszystkim w USA, Kanadzie, Szwajcarii i Niemczech [1÷10] od 50 lat z góry, a od końca lat

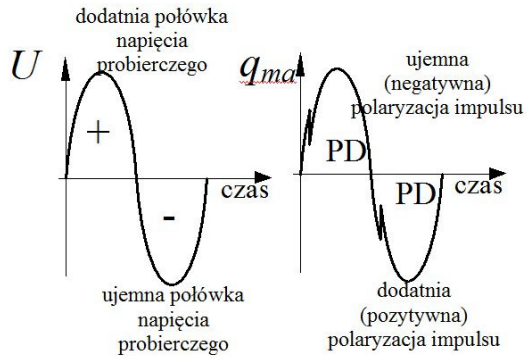
70-tych w szczególności prowadzono intensywne badania nad wykorzystaniem wnz do diagnostyki stanu izolacji w warunkach off-line i on-line. Były to bardzo kosztowne badania eksperymentalne, które doprowadziły do opracowania stosownych metod diagnozowania stanu izolacji maszyn elektrycznych w oparciu o specjalnie skonstruowaną aparaturę diagnostyczną [9]. W ocenie autora należy tu przede wszystkim wymienić wkład firm takich, jak CUTLER-HAMMER, IRIS, ADWEL, HIPOTRONIX, TETTEX, HAEFELY, LEMKE.

Z przeprowadzonych badań eksperymentalnych wynikało [1÷10], że: typowe uszkodzenia izolacji maszyn elektrycznych znajdują swoje odbicie w sygnale wnz i w charakterystyczny sposób „różnicują go” w zależności od miejsca wystąpienia.

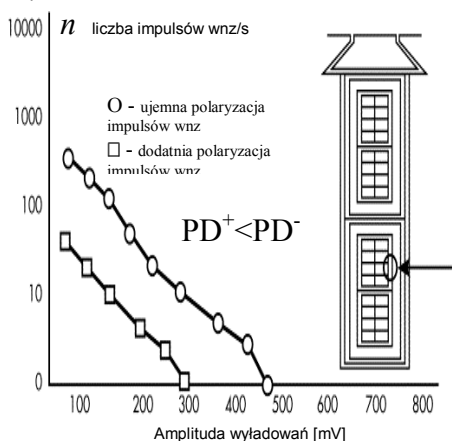
Na rys. 1.1 przedstawiono za [4] typowe źródła defektów w izolacji maszyn elektrycznych i odpowiadający im schemat zastępczy oraz pewne charakterystyczne cechy sygnałów wnz;

- szczelina powietrzna pomiędzy miedzią uzwojenia, a izolacją szczelina przy miedzi uz-

wojenia. Charakterystyczną cechą dla takiego defektu jest większa intensywność wnz w dodatniej połowie napięcia probierczego niż w połowie ujemnej – rys. 1.2, jednocześnie $q_{max+} > q_{max-}$, inny zapis $PD^+ < PD^-$,



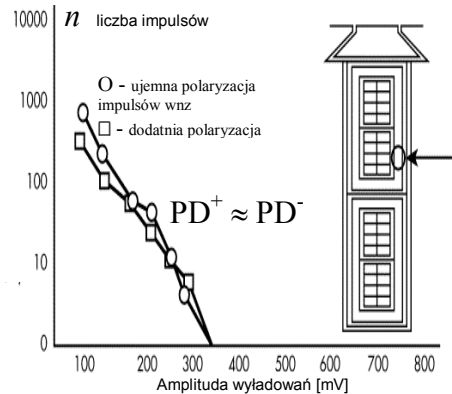
Rys. 1.1. Typowe uszkodzenia izolacji maszyn elektrycznych oraz odpowiadający im schemat zastępczy



Rys. 1.2. Częstotliwość impulsów wnz w funkcji amplitudy wyładowań przy przewodzie impulsów wnz o polaryzacji ujemnej, defekt typu szczelina powietrzna pomiędzy miedzią uzwojenia, a izolacją dla przykładowej maszyny elektrycznej [1]

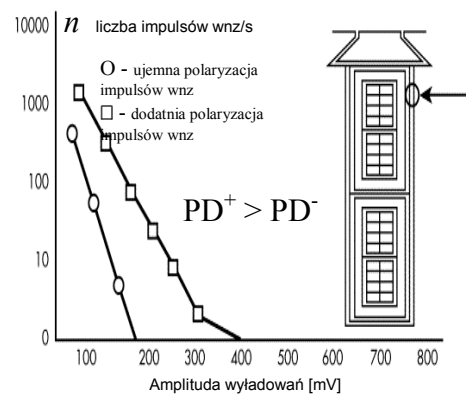
- szczelina powietrzna, pęknięcie wewnątrz izolacji. Charakterystyczną cechą dla ta-

kiego defektu jest podobna intensywność wnz w dodatniej i ujemnej połowie napięcia probierczego – rys. 1.3., jednocześnie $q_{max+} \approx q_{max-}$ inny zapis $PD^+ \approx PD^-$,



Rys. 1.3. Częstotliwość impulsów wnz w funkcji amplitudy wyładowań przy podobnej intensywności impulsów wnz o polaryzacji dodatniej i ujemnej, defekt typu szczelina powietrzna, pęknięcie wewnątrz izolacji dla przykładowej maszyny elektrycznej [1]

- szczelina powietrzna pomiędzy izolacją a rdzeniem stojana, nieskuteczna ochrona przeciwjarzeniowa żłobka, wyładowania na czołach uzwojenia. Charakterystyczną cechą dla takiego defektu jest większa intensywność wnz w ujemnej połowie napięcia probierczego niż w połowie dodatniej – rys. 1.4, $q_{max+} < q_{max-}$, inny zapis $PD^+ > PD^-$,



Rys. 1.4. Częstotliwość impulsów wnz w funkcji amplitudy wyładowań przy przewodzie impulsów wnz o polaryzacji dodatniej, defekt typu szczelina powietrzna, pomiędzy izolacją a rdzeniem stojana, dla przykładowej maszyny elektrycznej [1]

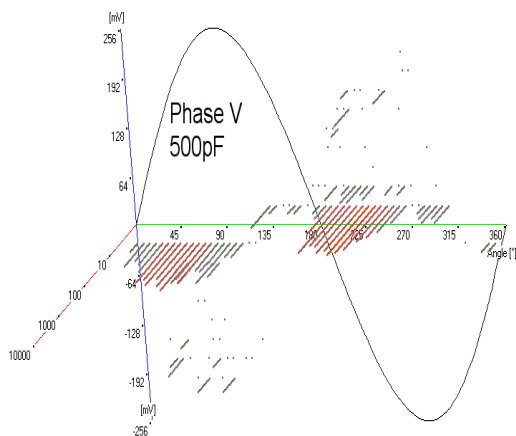
- uszkodzona powłoka przeciwwjarzeniowa czołowa; $q_{max+} < q_{max-}$, inny zapis $PD^+ > PD^-$ przy koncentracji ładunków maksymalnych dla kąta fazowego $\varphi = 225 \div 250^\circ$.

W literaturze [1÷10] spotyka się dwa sposoby określania obszarów kąta fazowego φ . Pierwszy z nich to określenie dodatnia i ujemna połówka napięcia probierczego. Drugi dotyczy polaryzacji występujących w tych połówkach impulsów PD. W dodatniej połówce napięcia probierczego występują impulsy PD^- o polaryzacji ujemnej (negatywnej), w ujemnej połówce napięcia probierczego występują impulsy o polaryzacji dodatniej (pozytywnej) PD^+ (rys. 1.1).

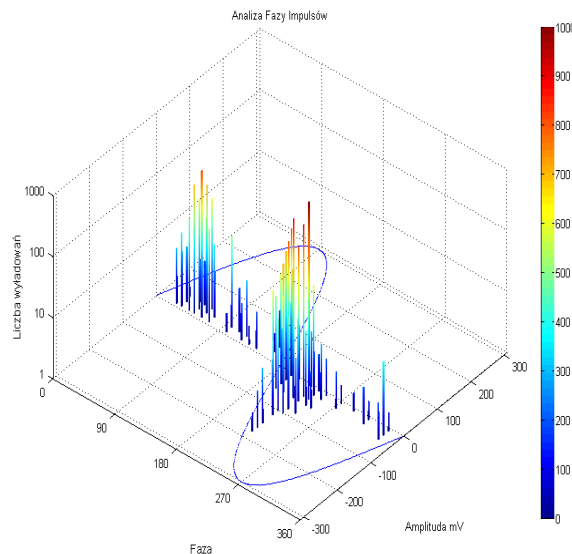
W praktyce pomiar wnz danego silnika odbywa się przy synchronizacji napięciem zewnętrznym wybranej fazy silnika. Ustawienia „odporności” analizatora wnz ze względu na wpływ zakłóceń odbywa się dodatkowo w oparciu o zmierzony poziom maksymalnych zakłóceń w miejscu pomiaru. Pomiary wnz silników on-line przy użyciu analizatorów przebiegają najczęściej bez wcześniejszej kalibracji toru pomiarowego. Kalibracji nie można najczęściej przeprowadzić ponieważ silników nie można w praktyce rozmontować. Kalibracja do pomiarów wnz o czym autor pisze [8, 9] wymaga bezpośredniego dostępu do czoł uzwojenia i żłobków stojana.

2. Pomiary wnz silników

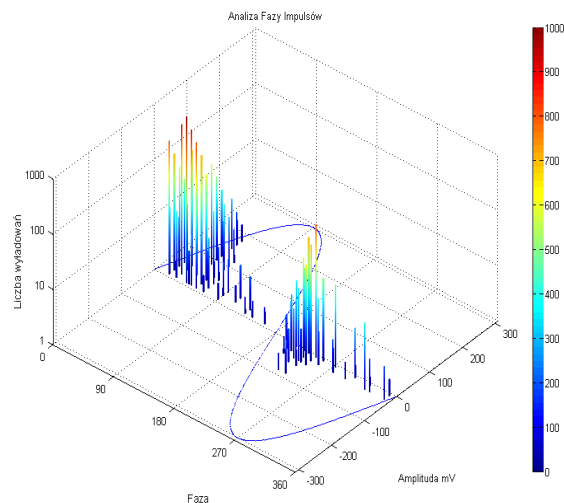
Na rys.2.1 przedstawiono wyniki pomiarów wnz dla przykładowego silnika na tle napięcia zasilającego wybranej fazy silnika, uznanej za fazę odniesienia. Na kolejnych rysunkach przedstawiono wyniki pomiarów wnz dla różnego rodzaju uszkodzeń - rys. 2.2÷2.6.



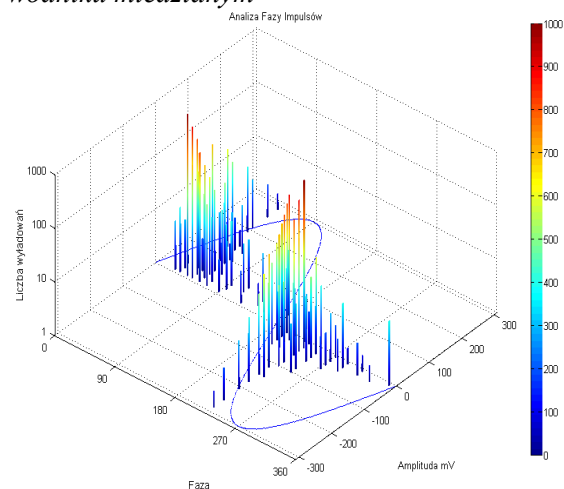
Rys. 2.1. Wyniki pomiarów wnz dla przykładowego silnika



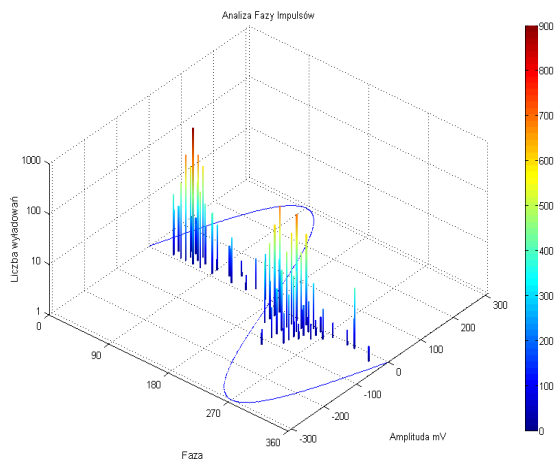
Rys. 2.2. Wyniki pomiarów wnz dla przykładowego silnika przy luźnym uzwojeniu



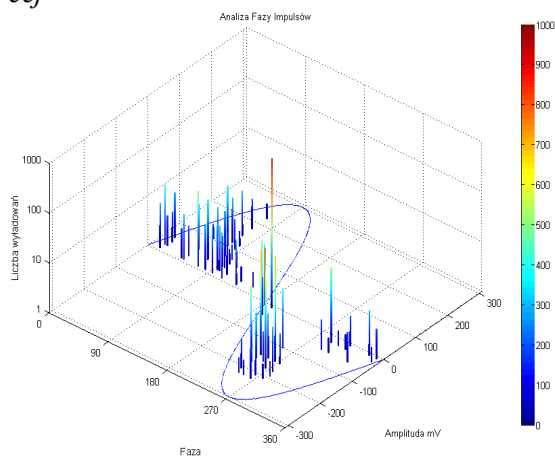
Rys. 2.3. Wyniki pomiarów wnz dla przykładowego silnika przy defekcie izolacji przy przewodniku miedzianym



Rys. 2.4. Wyniki pomiarów wnz dla przykładowego silnika przy defekcie w izolacji głównej



Rys. 2.5. Wyniki pomiarów wnz dla przykładowego silnika defekt w warstwie półprzewodzącej

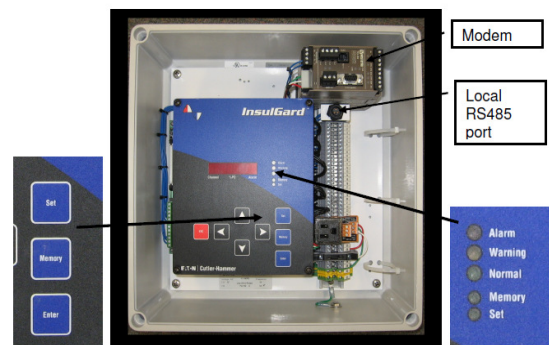


Rys. 2.6. Wyniki pomiarów wnz dla przykładowego silnika spowodowane zanieczyszczoną izolacją główną

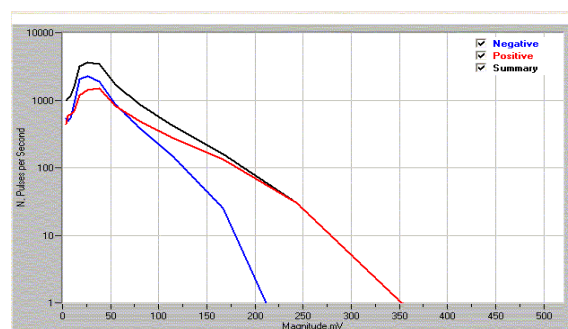
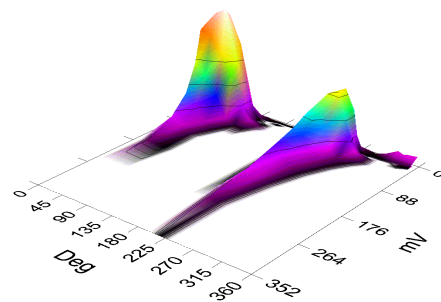
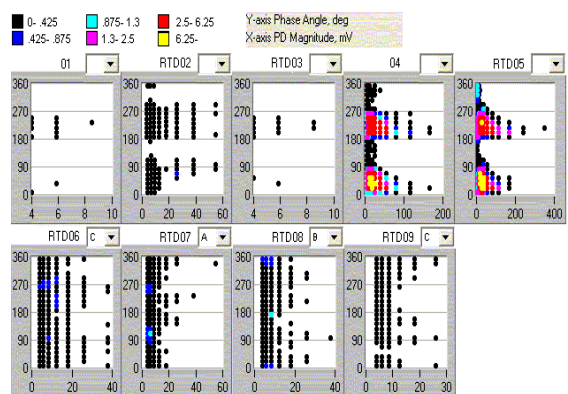
Wynik pomiaru podano dla jednego czujnika wnz typu kondensator pomiarowy.

W ocenie autora urządzenie amerykańskie InsulGard firmy Eaton Cutler-Hammer jest obecnie najlepszym urządzeniem stacjonarnym do pomiarów on-line wnz maszyn elektrycznych. Składa się z jednostki monitorującej oraz z czujników zamontowanych w danym silniku oraz w jego otoczeniu połączonych z tą jednostką. Urządzenie przedstawiono na rys. 2.7.

Urządzenie firmy Cutler-Hammer wraz z oprogramowaniem Cutler-Hammer umożliwia wykorzystanie innej często stosowanej w praktyce opcji prezentacji wyników pomiarów wnz dotyczy tzw. wykresów fazowo-rozdzielczych dla grupy kilku czujników. Przykładowe wyniki pomiarów wnz dla silnika o mocy 1,4 MW, 6 kV przedstawiono na rys. 2.8. Rezultaty tych pomiarów przedstawiono poniżej.



Rys. 2.7. Wygląd urządzenia InsulGard firmy Cutler-Hammer od czola



Rys. 2.8. Silnik o mocy 1,4 MW, 6 kV, pomiar wnz przy użyciu; RTD i czujników własnych: a) wykresy fazowe-rozdzielcze, zależność amplitudy, częstotliwości wnz od fazy, b) wykres fazowy jak wyżej 3D przy pomiarze czujnikiem RTD05 w pobliżu czoł uzwojeń, c) częstotliwość wnz w zależności od amplitudy wnz dla polaryzacji ujemnej i dodatniej, pomiar czujnikiem RTD05

3. Wnioski z badań

Największy sygnał wnz rejestrował dodatkowy termorezystor – RTD05 zamontowany przez autora w pobliżu czoł uzwojeń silnika, od strony przeciwnapędowej, największa wartość parametru Q_{max} – 995 mV w cyklu uśrednionym miesięcznym, wartości chwilowe przekraczały 1400mV. Drugi co do wielkości sygnał zarejestrował czujnik własny 04 znajdujący się w pobliżu RTD05, $Q_{max}=720$ mV w cyklu uśrednionym miesięcznym, wartości chwilowe dochodziły do 1400mV. Sygnały wnz z czujnika RTD05 i 04 są $10\div 8$ krotnie większe od sygnałów wnz z pozostałych czujników wnz. Autor stwierdza, że największą aktywność wnz zaobserwowano w strefie czoł uzwojenia od strony przeciwnapędowej - RTD05. Aktywność w okresie 3 miesięcy wyraźnie rosła. Dla parametru Q_{max} wzrost z poziomu 350 mV do 995 mV w cyklu uśrednionym miesięcznym, wzrost wnz przeszło 2,8-krotny. Jeszcze większy wzrost zanotowano dla czujnika własnego 04, gdzie nastąpił 3,35-krotny wzrost Q_{max} . Z poziomu 215 mV do 720 mV w cyklu uśrednionym miesięcznym. Tak gwałtowny wzrost aktywności wnz w pomiarach czujnikami RTD05 i 04 nie był związany ze zmianami temperatury uzwojeń, wilgotności względnej bądź obciążenia silnika. Nie towarzyszył temu wzrost wnz w innych punktach pomiarowych. Oznacza to, że z upływem czasu nastąpiło pogorszenie stanu izolacji w pobliżu czujników RTD05 i 04 lub intensywne zabrudzenie powierzchniowe na czołach przy jednoczesnym zużyciu izolacji sprzyjające wnz. Wykrycie wzmożonej aktywności wnz silnika w strefie czoł od strony przeciwnapędowej w strefie 40° od żebra górnego pionowego (patrzac na sprzęgło i licząc zgodnie ze wskazówkami zegara), było możliwe tylko dlatego, że autor zainstalował dodatkowe czujniki do pomiarów wnz od strony przeciwnapędowej w okolicach czoł. Pomiaru wnz wykonywane przy wykorzystaniu fabrycznych termorezystorów zamontowanych od cieplejszej strony silnika (napędowej) nie wskazują na wzrost aktywności wnz. Analiza fazowo-rozdzielcza wnz dla pomiarów wykonanych RTD05 (największa aktywność) wykazuje przewagę wnz o polaryzacji dodatniej co wzmacnia wniosek zawarty w pkt. 3, że przyczyną wzmożonej aktywności wnz rejestrowaną

przez RTD05 są wnz z okolicy czoł. W horyzoncie obserwacji kilkutygodniowej zaobserwowano zależność aktywności wnz od zmiany wilgotności i temperatury uzwojeń. Jest to zależność o charakterze następującym: wilgotność, temperatura maleje – wnz wzrasta i odwrotnie. Zaobserwowano to przede wszystkim dla wielkości Q_{max} i PDI . Rozmiary szczelin wewnątrz uzwojeń stojana są najczęściej odwrotnie proporcjonalne od temperatury. Gdy temperatura wzrasta, miedź uzwojenia i materiał izolacyjny rozszerzają się powodując zmniejszanie rozmiarów szczelin, a tym samym zmniejszając intensywność wnz. Wzrost intensywności wnz może mieć miejsce przy wystąpieniu rozwarstwienia izolacji. Wyraźne uzależnienie aktywności wnz od wilgotności oznaczać może pęknięcia powierzchniowe w izolacji. W związku z dalszym wzrostem aktywności wnz, po 10 maja zaobserwowano bardzo intensywny wzrost Q_{max} w funkcji czasu, autor zaproponował: zatrzymanie napędu i przegląd uzwojenia silnika w szczególności od strony przeciwnapędowej w okolicy wspomnianych wyżej czujników RTD05 i 04. Okazało się, że uzwojenie silnika w okolicy tych czujników jest mocno zabrudzone, a izolacja prawdopodobnie intensywniej zużyta niż gdzie indziej. Uzwojenie oczyszczono, poddano zabiegom konserwacyjnym, po czym silnik ponownie uruchomiono. Po ponownym uruchomieniu silnika intensywność wnz rejestrowana przez czujniki RTD05 i 04 w sposób zasadniczy zmalała, odpowiednio 6,63 i 5,14 krotnie. Zdecydowano się również na zamówienie nowego silnika. Należy stwierdzić, że gdyby nie pomiar on-line wnz silnika, nie wiedzielibyśmy o pogłębiającym się zabrudzeniu części czołowej uzwojenia od strony przeciwnapędowej. Można domniemywać, że gdyby nie zatrzymanie silnika i nie oczyszczenie uzwojenia to pogłębiającemu się zabrudzeniu towarzyszyłby dalszy wzrost intensywności wnz, a to pogłębiałoby degradację izolacji i mogłoby się skończyć przedwczesnym uszkodzeniem izolacji.

Literatura

- [1]. CUTLER-HUMMER - *IPDS Installation Manual*. Nota Aplikacyjna, 2010.
- [2]. Florkowska B.: *Wyładowania niezupełne w układach izolacyjnych wysokiego napięcia – analiza mechanizmów, form i obrazów*. Wyd. IPPT PAN, Warszawa 1997.

- [3]. Florkowska B, Florkowski M., Włodek R., Zydrón P.: *Mechanizmy, pomiary i analiza wyladowań niezupełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia*. Wyd. IPPT PAN, Warszawa 2001.
- [4]. Florkowski M.: *System diagnostyczny oceny układów elektroizolacyjnych wysokiego napięcia*. Rozprawa doktorska, AGH, Kraków, 1994.
- [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]. Gulski E.: *Diagnozowanie wyladowań niezupełnych w urządzeniach wysokiego napięcia w eksploatacji*. Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.
- [7]. Rusow W.A.: *Metody i sredstwa kontroli wysokowoltowo oborudowanija izolacji*. Dimrus, 2011.
- [8]. Stone G.C., Boulter E.A., Culbert I., Dhirani H.: *Electrical insulation for rotating machines*. IEEE PRESS series on Power Engineering, USA, 2004.
- [9]. Szymaniec S.: *Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń i stanu łożysk silników indukcyjnych klatkowych w warunkach przemysłowej eksploatacji*. Studia i Monografie z.193. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2006.
- [10]. Szymaniec S.: *Badania, eksploatacja i diagnostyka zespołów maszynowych z silnikami indukcyjnymi klatkowymi*. Wyd. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej 2013, Opole, Studia i Monografie, nr 333.
- [11]. Zydrón P.: *Zastosowanie analizy czasowej i częstotliwościowej do badania wyladowań niezupełnych w układach izolacyjnych wysokiego napięcia*. Rozprawa doktorska, AGH Kraków 2001.

Autor

dr hab. inż. Sławomir Szymaniec prof. PO.
Politechnika Opolska
Wydział Elektrotechniki, Automatyki
i Informatyki
Instytut Elektrotechniki Przemysłowej
i Diagnostyki
45-758 Opole ul. Prószkowska 76, bud. Nr 1.
s.szymaniec@po.opole.pl