

Poprawna ocena wyników pomiaru emisji wnz maszyn elektrycznych w zmiennych warunkach mikroklimatycznych

Streszczenie. Artykuł jest poświęcony zagadnieniom związanym z zachowaniem należytej staranności podczas pomiaru emisji wnz realizowanych w warunkach przemysłowej eksploatacji, jak również poprawności oceny wyników pomiaru emisji wnz. Autorzy zwracają szczególną uwagę na konieczność poprawnej interpretacji wyników pomiaru ze względu na warunki mikroklimatyczne panujące w pomieszczeniu pracy badanych maszyn. Jest to szczególnie istotne ze względu na istnienie silnej korelacji wzajemnej między temperaturą i wilgotnością powietrza a poziomem mierzonej emisji wnz.

Abstract. The article presents the results of research and analysis which include an assessment of influence of selected microclimate parameters on the issue of partial discharges (PD) in high power drives in the energy sector. The author presented the results of their own research, which was made in industrial conditions in a long period of time. The study included measurement of environmental parameters such as the air temperature, radiant temperature, air velocity, humidity and the relative moisture of air. It also measured the parameters of PD like: PD intensity, amplitude of PD and the PD pulses. (*The Analysis Of the Influence of Environmental Conditions on the Measurement of Emission Partial Discharges in Electrical Machines*).

Słowa kluczowe: maszyny elektryczne WN, wyladowania niepełne, diagnostyka stanu izolacji, mikroklimat.

Keywords: HV electrical machines, Partial Discharge, diagnosis of the winding insulation, microclimate.

doi:10.12915/pe.2014.01.58

Wstęp

Złożoność zjawisk towarzyszących detekcji wnz oraz samego procesu pomiaru impulsu prądowego i towarzyszącej powstawaniu impulsu emisji fali elektromagnetycznej nie pozwala producentom podać, typowych dla aparatury pomiarowej, parametrów metrologicznych oferowanego sprzętu. W dokumentacji technicznej aparatury, wykorzystanej do pomiaru wnz, najczęściej nie podaje się takiej charakterystyki.

Przy praktycznej ocenie wyników pomiaru emisji wnz, trudno jest zatem odnosić się do konkretnej wartości zmierzonego wyladowania wnz. Autorom bliski jest pogląd, powszechnie prezentowany w literaturze [1, 3, 4, 5, 18, 19, 20], że sygnały wnz zmierzone na badanej maszynie nie muszą być identyczne jak przebiegi rzeczywiste wnz maszyny. W ocenie końcowej stanu izolacji metodą wnz decyduje przede wszystkim trend zmian wnz.

Jakość pomiaru emisji wnz

Obecnie oferowany przez producentów sprzęt pomiarowy realizuje pomiar emisji wnz przy użyciu aparatury skutecznie ograniczającej wpływ szumów i zakłóceń na wynik pomiaru. Podczas pomiarów w sposób ciągły na bieżąco wykorzystuje ona metody ograniczenia wpływu zakłóceń, między innymi poprzez: wstępną analogową filtrację sygnału mierzonego, dyskryminację poziomu i biegunowości impulsów, selekcję impulsów metodą okna czasowego, eliminację zakłóceń metodą okna czasowego, zastosowanie techniki określania kierunku propagacji sygnału, cyfrowe przetwarzanie sygnałów.

Wstępną analogową filtrację sygnału mierzonego najczęściej dokonuje się poprzez zastosowanie filtra górnoprzepustowego, który przepuszcza do analizatora jedynie sygnał w zakresie od 1 do 20MHz.

Selekcja impulsów wraz z eliminacją zakłóceń metodą okna czasowego polega na klasyfikowaniu sygnałów na podstawie czasu trwania pierwszego okresu impulsu a następnie odrzucania wszystkich sygnałów, których czas trwania pierwszego okresu jest dłuższy od 1 μ s.

Istotną z punktu widzenia zakłóceń elektromagnetycznych jest metoda eliminowana zakłóceń realizowana w układzie progowym w tzw. kanale

szumowym. Elementem zabezpieczenia przed przedostaniem się zbyt dużego napięcia do analizatora wnz jest odgromnik oraz skuteczne uziemienie ekranów kabli koncentrycznych. Pomiar odbywa się przy synchronizacji napięciem zewnętrznym wybranej fazy silnika. Ustawienia tzw. „odporności” analizatora ze względu na wpływ zakłóceń odbywa się poprzez pomiar ciągle poziomu zakłóceń w miejscu pomiaru w tzw. kanale pomiaru szumu.

Podczas realizowanych obserwacji środowiska pracy pewnego silnika okazało się, że najintensywniejszymi zakłóceniami były: okresowa praca spawarki w bliskiej odległości od badanego silnika (8 mV) oraz praca napędu suwnicy (6 mV). Podczas normalnej pracy maszyn elektrycznych poziom maksymalnych zakłóceń jest znacznie mniejszy i najczęściej nie przekracza 3 mV.

Pomiar zakłóceń jest realizowany w całym okresie trwania badań w sposób ciągły poprzez czujnik RTD, który należy montować na zewnątrz silnika w jego bliskiej odległości. Poziom maksymalnego napięcia indukowanego przez czujnik stanowi poziom progu dla interpretacji sygnału pochodzącego od wnz. Analizator pomiarowy jako użyteczny interpretuje jedynie te sygnały, których poziom jest większy od wartości zakłócenia zarejestrowanego w kanale szumów. W sytuacji kiedy poziom zakłóceń jest większy od poziomu sygnału wnz pomiar taki jest odrzucany.

Wpływ mikroklimatu na emisję wnz

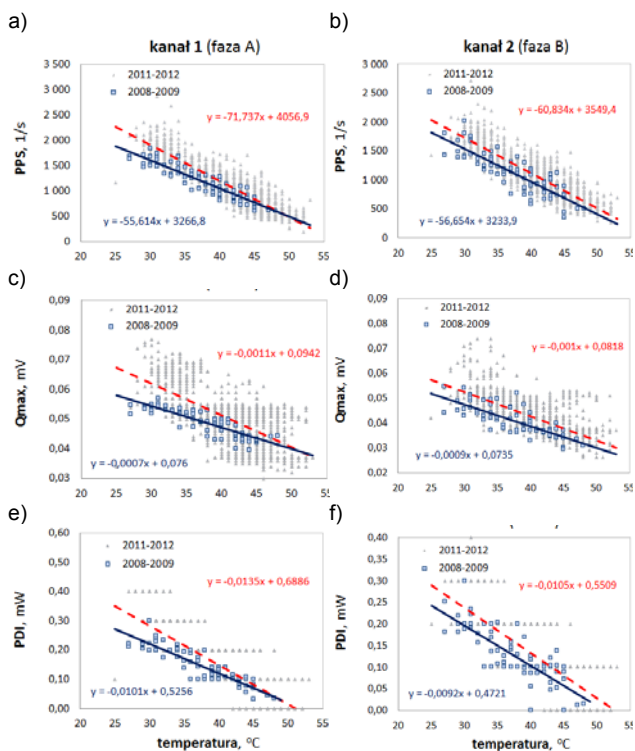
Na impuls elektryczny powstający w inkluzji gazowej wewnątrz dielektryka stałego ma wpływ przede wszystkim napięcie przyłożone do zewnętrznych elektrod, przenikalność elektryczna dielektryka, przenikalność elektryczna inkluzji gazowej oraz pojemności składowe równoległe do źródła wnz w układzie izolacyjnym oraz pojemności składowe szeregowo z inkluzją gazową. Właściwości elektryczne dielektryka podczas prawidłowej eksploatacji maszyny ulegają zmianom bardzo powoli w stosunku do zmian objętości, kształtu oraz położenia inkluzji gazowych wewnątrz układu izolacyjnego [15]. Okresowe zmiany objętości i kształtów inkluzji gazowej wynikają najczęściej z chwilowej rozszerzalności objętościowej kompozytów użytych do budowy układu elektroizolacyjnego

na skutek narażeń elektrycznych, termicznych, mechanicznych, termo-mechanicznych, chemicznych i klimatycznych.

W detekcji *wnz* ilość rejestrowanych impulsów *PPS*, ich amplituda Q_{max} , wielkość wyładowań *PDI* oraz charakter polaryzacji i położenie *wnz* względem przebiegu napięcia pomiędzy fazą a uziemieniem, świadczy o stanie technicznym izolacji. Większa rejestrowana liczba impulsów w ciągu jednej sekundy oznacza, że w izolacji znajduje się więcej źródeł generujących wyładowania niezupełne. Większa amplituda wyładowań świadczy o tym, że głęboka jest degradacja izolacji. Znak polaryzacji ładunków mówi o położeniu inkluzji w izolacji względem miedzi i stali, a położenie *wnz* względem wykresu fazowo-rozdzielczego odnosi się do położenia defektów w szczelinie lub w czole uzwojenia.

Istotnym zagadnieniem z punktu widzenia prowadzonych rozważań jest ocena wpływu wielkości otaczającego środowiska na jakość pomiaru *wnz*.

Analiza własnych badań jak również wnioski wynikające z licznych publikacji [1, 3, 4, 14, 15, 16, 18, 20] świadczą o tym, że temperatura i wilgotność powietrza wpływa na wielkość emisji *wnz* oraz na okresową zmianę lokalizacji wzmożonej aktywności wyładowań w układzie izolacyjnym. Wzrost temperatury w większości układów izolacyjnych powoduje chwilowe zmniejszenie emisji *wnz* wykazując na tzw. korelację ujemną. Z pośród badanych przez autorów maszyn kilka wykazało takie cechy. W takich maszynach w miarę wzrostu temperatury materiał spoiwa izolacji żłobkowej (*groundwall*) i miedzi rozszerza się zamykając puste przestrzenie zmniejszając w ten sposób emisję *wnz*. Duży ujemny wpływ temperatury sugeruje na istnienie znacznych wewnętrznych rozwarstwień.



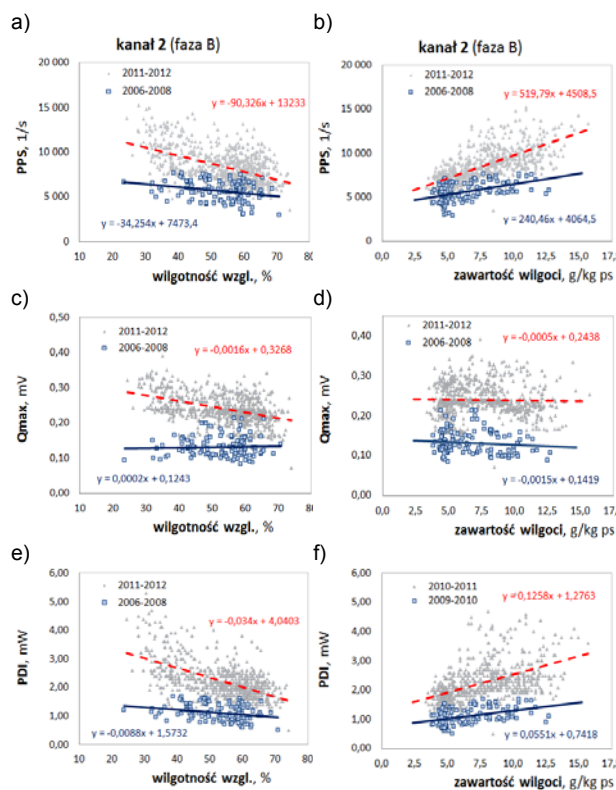
Rys.1. Diagramy korelacyjne wskaźników *wnz* w funkcji temperatury powietrza z uwzględnieniem procesu starzenia się izolacji przewodów fazy A (a, c, e) i przewodów fazy B (b, d, f)

Przykładowe wyniki pomiaru emisji *wnz* w funkcji zmieniającej się w pomieszczeniu temperatury dla jednego z badanych silników przedstawiono na rysunku 1. Wyniki obejmują okres trzech lat. Wynika z nich, że poziom emisji

wnz silnie zależy od temperatury powietrza. W tym okresie nastąpił zauważalny ilościowy i jakościowy wzrost emisji *wnz* o czym świadczy wzrost kąta nachylenia korelacji liniowej we wszystkich badanych wskaźnikach emisji *wnz*.

Zdarzają się maszyny, które wykazują na inne cechy układu izolacyjnego. Obserwuje się w nich, że wzrost temperatury powoduje również wzrost emisji *wnz* (korelacja dodatnia). Zjawisko to oznacza degradację powłoki półprzewodzącej tzw. stopniującej (*semicon/grading*). W miarę, jak temperatura uzwojenia stojana wzrasta, opór powłok maleje i powoduje wzrost powierzchniowej aktywności *wnz*. Układy izolacyjne wykazujące taką właściwość są narażone zazwyczaj na bardzo powolny mechanizm niszczenia powłok ochronnych. W maszynach chłodzonych powietrzem wzrostowi wyładowań powierzchniowych towarzyszy silne wytwarzanie się ozonu. Do kontroli tego typu wyładowań zaleca się dodatkowy pomiar poziomu stężenia ozonu [15,16].

W maszynach chłodzonych powietrzem duży wpływ na emisję *wnz* ma zmiana wilgotności powietrza. Wilgotność obniża wytrzymałość powietrza na przebicie elektryczne, a przez to powoduje wzrost emisji *wnz* na powierzchniach powłok półprzewodzących. W niektórych sytuacjach zmiana wilgotności powietrza powoduje zwiększenie *wnz*, a w innych zmniejszenie. Dowiedziono w literaturze [3, 4, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20], że w niektórych sytuacjach wpływ wilgotności powoduje okresowe wahania emisji *wnz* sięgające aż 300%. Z badań własnych autorów wynika, że zmiana emisji *wnz* w funkcji zmian wilgotności rzeczywiście może sięgać 200 ÷ 250%.



Rys.2. Diagramy korelacyjne wskaźników *wnz* w funkcji wilgotności względnej powietrza (a, c) oraz udziału wilgoci w powietrzu (b, d) z uwzględnieniem procesu starzenia się izolacji uzwojeń

Wraz z upływem czasu, wpływ wilgotności na emisję *wnz* jest coraz większy. Na rys. 2. porównano wpływ wilgotności względnej i bezwzględnej na wskaźniki *wnz* pochodzące z dwóch okresów pomiarowych, tj. z początku prowadzenia badań (lata 2006-2008) oraz z okresu ostatnich dwóch lat (2011-2012). W drugim okresie ilość

impulsów, ich amplituda oraz moc są znacznie większe niż na początku badań przy tej samej wilgotności powietrza. Zdaniem autorów świadczy to o pogarszaniu się jakości powłok półprzewodzących w części czołowej uzwojeń. Eksploatacja takiej maszyny przy zbyt małej wilgotności względnej powietrza (poniżej 40%) wiąże się z dodatkowym narażaniem jej powłok zewnętrznych na większe wyładowania.

Podsumowanie

W podsumowaniu swoich rozważań autorzy uważają, że zmiana temperatury i wilgotności powietrza wpływa na poziom aktywności wnz. Okresowy wzrost emisji wnz nie powoduje natychmiastowego skutku w postaci pogorszenia stanu technicznego izolacji. Skutek wzmożonej aktywności wnz oraz innych oddziaływań jest obserwowany dopiero w dłuższym horyzoncie czasu. Jak wskazują wyniki prowadzonych badań efekt starzenia jest widoczny dopiero po 3 – 4 latach. Trudność w należytej ocenie stanu izolacji metodą wnz stanowi bez wątpienia ocena wartości wskaźników wnz określonych w różnych warunkach mikroklimatycznych.

Poprawna ocena stopnia degradacji izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych przy wykorzystaniu metody wyładowań niepełnych wymaga zachowania należytej staranności. Powinna ona polegać na porównywaniu wskaźników PPS , Q_{max} i PDI mierzonych w bardzo podobnych warunkach mikroklimatycznych i wykonanych w bardzo zbliżonych warunkach eksploatacyjnych badanych maszyn. Okresowa zmiana poziomu wyładowań wywołana zmianami mikroklimatu może spowodować błędną ocenę stanu technicznego izolacji.

Autorzy stoją na stanowisku, aby nie kwalifikować wpływu mikroklimatu na emisję wnz jako zakłócenie pomiarowe w rozumieniu metrologicznym. Nie są znane bowiem wyniki badań, które wskazywałyby na fakt, iż zmiana temperatury i wilgotności powietrza wpływała na okresowy wzrost bądź obniżenie poziomu zakłóceń sygnału pomiarowego wnz aparatury pomiarowej. Właściwszym jest by wpływ mikroklimatu, na krótkookresową zmianę aktywności wnz, uznać jako uciążliwość przy dokonywaniu oceny stanu izolacji na podstawie pojedynczych wybranych pomiarów. Z perspektywy przeprowadzonych badań długookresowych wydaje się celowe dokonywanie oceny stanu izolacji na podstawie dużej ilości danych pomiarowych gromadzonych w długim okresie czasu. W takiej ocenie eliminuje się bowiem wpływy chwilowych, przypadkowych stanów badanego układu izolacyjnego, na który mogą mieć wpływ bardzo różne przyczyny, np. chwilowe dynamiczne narażenia elektryczne, termiczne, mechaniczne, itp. Odpowiedzialne stosowanie metody wnz do oceny stanu izolacji maszyn elektrycznych wymaga stosowania stacjonarnych systemów do monitorowania emisji wnz rozbudowanych dodatkowo o pomiar wielkości mikroklimatu. Dopiero po zgromadzeniu dużej próby danych pomiarowych i poddaniu jej analizie statystycznej według zaproponowanej w monografii metodologii [13] można rekomendować daną maszynę do odstawienia i przeprowadzenia badań stanu izolacji, ale już w warunkach *off-line*. Badania stanu izolacji metodami *off-line* są najważniejsze i diagnostycznie rozstrzygające. Wówczas z powodzeniem można zastosować między innymi: metodę *T. Glinki* na podstawie pomiarów napięciem stałym, metodę w oparciu o pomiary PI, C, SV, DD – test *Meggera*, metodę udarów napięciowych – test *Bakera* czy metodę rampy wysokonapięciowej, DC Ramp Test.

Artykuł napisano w ramach realizacji projektu badawczego własnego Nr N N510 536639 „Czujniki do pomiarów *off-line* i *on-line* wyładowań niepełnych w silnikach elektrycznych

oraz system kalibracji torów pomiarowych” Projekt finansowany przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

LITERATURA

- [1] ADWEL: *PD monitoring*, Nota Aplikacyjna 2003
- [2] BALCERZAK A.: *Narażenia przepięciowe izolacji silników elektrycznych i ich ochrona*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne nr 46, 1993, wyd. BOBRME Komel, s. 33-35.
- [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 1998
- [4] BLOKHINTSEV I., PATTERSON C.: *Continuous Partial Discharge Monitoring on rotating Machines*, 75th Annual International Doble Client Conference, 2008.
- [5] DOBLE ENGINEERING COMPANY: *Application for PD Monitoring on Generators*, 76th Annual International Doble Client Conference, 2009.
- [6] 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.
- [7] GREEN V.: *Results from US Utilities Using New Instrument for Continuous On-Line Partial Discharge Measurement*. Fourth Int. Conf. on Generator and Motor Partial Discharge Testing, Houston, Texas. USA.
- [8] GULSKI E.: *Diagnostowanie wyładowań niepełnych w urządzeniach wysokiego napięcia w eksploatacji*. Wyd. Polit. Warszawskiej, Warszawa 2003.
- [9] LUCAS J. R.: *High Voltage Engineering*, Ebook 2001.
- [10] MEGGS R.W., DAFNEY K.: *Partial Discharge Monitoring in Marine HV Systems*. IMAREST 2011.
- [11] PLUTECKI Z.: *Analiza zjawisk ciepło-przepływowych kształtujących się w otoczeniu pracujących maszyn elektrycznych*, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne Nr 96 (3/2012), 2012 r., s.19-24.
- [12] PLUTECKI Z.: *Analiza wpływu warunków otoczenia na emisję wyładowań niepełnych w maszynach elektrycznych*, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne Nr 95 (2/2012), 2012r., s. 147-152.
- [13] PLUTECKI Z.: *Analiza wpływu mikroklimatu na emisję wyładowań niepełnych maszyn elektrycznych w warunkach przemysłowej eksploatacji*. Studia i Monografie z. 325, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2012r.
- [14] 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.
- [15] IRIS, broszury informacyjne i karty katalogowe, źródło www.irispower.com, 2012.
- [16] Kane C., Golubev A., Blokhintsev I. Patterson C.: *Our Response – Use of Resistive Temperature Detectors as Partial Discharge Sensor in Rotating Equipment*. Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, 2007, str.183-188.
- [17] Rusow W. A.: *Izmirzenie ciastycznych pazriadov w izoliaci vysokowolttno oborudowania*, Dimrus, ISBN No 978-5-94614-177-2, B.A. Rusow, 2011.
- [18] Warren V.: *Partial Discharge Testing: A Progress Report*. Iris Rotating Machinery Conference, USA, Santa Monica, June 2003, pp. 1-13.
- [19] Warren V.: *Partial Discharge Testing: A Progress Report*. Statistical Evaluation of PD Data, PD Progress Report, IRMC 2009.
- [20] Nota aplikacyjna OMICRON, High-End Measurement and Analysis System for Partial Discharges, OMICRON L2069, Houston November 2012.

Autorzy: dr hab. inż. Sławomir Szymaniec, prof. PO, Politechnika Opolska, Katedra Elektrowni i Systemów Pomiarowych, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, E-mail: s.szymaniec@po.opole.pl; dr hab. inż. Zbigniew Plutecki, prof. PO, Katedra Zarządzania Energetyką, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, E-mail: z.plutecki@po.opole.pl.