

Zbigniew Plutecki,
Sławomir Szymaniec,
POLITECHNIKA OPOLSKA, Opole

KOMFORT CIEPLNY MASZYN ELEKTRYCZNYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA

THE THERMAL COMFORT OF HV ELECTRICAL MACHINES

Streszczenie: W artykule przedstawiono definicję pojęcia i sposób wyznaczania warunków komfortu cieplnego maszyn elektrycznych wysokiego napięcia na podstawie pomiaru aktywności wyładowań niezupełnych (*wnz*) oraz parametrów mikroklimatu mierzonych metodami *on-line* w warunkach przemysłowej eksploatacji. Propozycja polega na wyznaczeniu takiej temperatury i wilgotności powietrza, przy których aktywność *wnz* jest na bardzo niskim poziomie. Przedstawione w artykule wyniki badań własnych dowodzą istnienia takich warunków mikroklimatycznych, w których poziom aktywności *wnz* może zostać zredukowany do minimum. Należy jednak pamiętać, aby wyznaczone tym sposobem warunki mikroklimatyczne nie wpływały negatywnie na pozostałe parametry eksploatacyjne maszyn elektrycznych.

Abstract: This article describes a definition of thermal comfort and how to determine the conditions of thermal comfort for high voltage electrical machines using at work. The basis for determining the conditions of comfort is to measure the PD and microclimate measured *on-line* methods in industrial use. The proposal involves the determination of the temperature and moisture and relative humidity at which the PD activity is at a very low level. Presented in this paper results of the study show the existence of such microclimatic conditions in which the level of PD activity can be reduced to a minimum. Note, however, that designated this way microclimatic conditions do not adversely impact other operating parameters of electrical machines.

Słowa kluczowe: *maszyny elektryczne, izolacja uzwojeń, wyładowania niezupełne, komfort cieplny maszyn*
Keywords: *electrical machines, winding insulation, PD, thermal comfort electrical machines*

1. Wstęp

Użytkownicy maszyn elektrycznych wysokiego napięcia z grupy tzw. urządzeń krytycznych są poddawani ciągłej presji otoczenia wynikającej z coraz większych oczekiwań w zakresie wysokiej efektywności i niezawodności pracy tych urządzeń.

Największy udział wśród przyczyn awarii maszyn elektrycznych wymienia się uszkodzenia łożysk oraz awarie układu elektroizolacyjnego uzwojeń stojana (tabela 1) [14].

Tabela 1. Struktura uszkodzeń maszyn el. WN

Przyczyna awarii	Procentowy udział
Łożyska	41%
Stojan	37%
Wirnik	10%
Osprzęt, wyposażenie dodatkowe i inne	12%

W obecnych warunkach monitorowanie stanu technicznego łożysk jest już prawie normą. Coraz częściej monitoring stanu technicznego maszyn elektrycznych jest stosowany również

do oceny stanu izolacji uzwojeń stojanów [5, 9, 14]. Na podstawie obserwowanych trendów zmian badanych parametrów technicznych można podejmować na bieżąco decyzje o pracach remontowych i ewentualnych modernizacjach w taki sposób, aby okres przestoju był jak najkrótszy a koszt remontu minimalny.

Prawidłowa i długotrwała eksploatacja maszyn elektrycznych wymaga znajomości wielu złożonych zagadnień z zakresu zjawisk elektrycznych, termicznych, mechanicznych, termomechanicznych, cieplno-przepływowych, promieniowania czy zjawisk chemicznych [2, 9, 10, 11, 12, 13, 14]. Elementami maszyn elektrycznych najbardziej narażonymi na działanie wszystkich wyżej wymienionych zjawisk jednocześnie są izolacje uzwojeń stojana i wirnika. Izolacja uzwojeń stojana dodatkowo narażona jest na emisję wyładowań niezupełnych (*wnz*), których natura i przebieg może w konsekwencji doprowadzić do trwałego jej uszkodzenia [1, 2, 3, 13, 14].

2. Emisja wyładowań niepełnych w diagnostyce maszyn elektrycznych

Pomiar emisji wyładowań niepełnych (*wnz*) podczas eksploatacji maszyn dostarcza cennych informacji o jakości technologii wykonania maszyny i o aktualnym stanie układów izolacyjnych jej uzwojeń.

Na wielkość emisji *wnz* w układach izolacyjnych wysokiego napięcia mają wpływ czynniki inicjujące w postaci wewnętrznych defektów struktury, albo gdy sprzyja im usytuowanie zewnętrznych elektrod tego układu [12, 13]. Wyładowania rozwijają się głównie w defektach zwanych inkluzjami i porami, gdy występują mikrostrza w gazie lub w dielektryku stałym i na powierzchniach granicznych między dielektrykiem stałym i gazowym. Pod wpływem oddziaływań elektrycznych, cieplnych, mechanicznych oraz otaczającego środowiska następuje łączenie się inkluzji w większe wtrąciny gazowe co prowadzi do intensyfikacji emisji *wnz*.

Gdy izolacja ulega degradacji, częstość i intensywność *wnz* wzrasta [3, 6, 7, 14]. W dużych generatorach i silnikach wysokiego napięcia próby oceny stanu uzwojeń poprzez rejestrację *wnz* są z powodzeniem realizowane już od drugiej połowy ubiegłego wieku [3, 6]. Choć wielkość impulsów *wnz* nie przekłada się bezpośrednio na prognozę czasu „życia” badanego uzwojenia to metody pomiaru *wnz* i wykorzystania ich w ocenie stanu technicznego izolacji uzwojeń są cały czas rozwijane i udoskonalane [6, 7, 8, 9].

Wyładowaniom niepełnym w układzie izolacyjnym towarzyszą różne zjawiska fizyczne, których obserwacja i pomiary mogą być wykorzystane do detekcji *wnz* i następnie do wyznaczenia wartości parametrów opisujących jakość i ilość emisji *wnz*. Zjawiskami tymi są między innymi: występowanie impulsu prądowego, emisja fal elektromagnetycznych, zmiany strat dielektrycznych, reakcje chemiczne, udarowe odkształcenia sprężyste i towarzysząca im emisja fali akustycznej [8, 13, 14].

W zależności od układu izolacyjnego, rodzaju dielektryka oraz typu *wnz*, poszczególne efekty mogą występować z różnym nasileniem. W chwili wystąpienia *wnz*, w jego kanale lub wzdłuż jego drogi następuje gwałtowny ruch ładunków. Ten impuls prądowy jest na ogół bardzo mały, ale może być w specjalny sposób zmierzony [3, 4, 6, 8, 13, 14]. Z impulsem prą-

dowym związane jest pojawienie się fali elektromagnetycznej. Fala elektromagnetyczna rozchodzi się we wszystkich kierunkach, a jej natężenie jest zależne od prądu przepływającego w kanale *wnz*.

Impuls prądowy i emisja fali elektromagnetycznej są tymi zjawiskami, które stanowią podstawę detekcji *wnz* metodami elektrycznymi [3, 4, 6, 14]. Wystąpienie *wnz* wewnątrz układu izolacyjnego może być wykryte przez rejestrację zmian parametrów elektrycznych całego układu, obserwowane na jego zewnętrznych elektrodach. Wyjaśnienie zasad pomiaru przedstawiono w literaturze [3, 4, 6, 8, 14].

Definicje pojęć związanych z emisją *wnz* zawarte są w normie krajowej PN-EN60270 oraz w normach międzynarodowych IEC 60270:2000 i IEEE-1434. Najczęściej do opisu emisji wyładowań niepełnych wykorzystuje się wskaźniki określające: intensywność wyładowań rejestrowaną w jednej sekundzie (*PPS*), amplitudę wyładowań w mV (Q_{max}) oraz moc wyładowań w mW (*PDI*).

3. Monitoring emisji *wnz*

W literaturze można znaleźć różne podziały metod pomiaru emisji *wnz* [13, 14]. Podstawowy podział obejmuje:

- metody bezpośrednie elektryczne,
- metody elektromagnetyczne,
- metody detekcji akustycznej,
- metody optyczne,
- metody chemiczne.

Rekomendowane metody pomiaru emisji *wnz* ze względu na obszar zastosowań przedstawiono w literaturze. W obszarze maszyn wirujących zalecaną metodą pomiaru *wnz* jest metoda elektryczna z wykorzystaniem sprzęgaczy pojemnościowych, czujników RTD oraz cewek Rogowskiego [10].

Oferta komercyjnych systemów do pomiaru i monitoringu *wnz* jest wciąż rozwijana i rozszerzana. Do najważniejszych firm oferujących systemy do monitorowania *wnz* należy zaliczyć systemy *Iris*, *Eaton*, *Adwel*, *Omicron* czy *Vibrocenter* [1, 4, 6, 14].

4. Przebieg i interpretacja wyników pomiaru *wnz*

Poprawne prowadzenie pomiarów *wnz* jest trudne [1, 8, 9, 13, 14]. Jednym z głównych powodów są wartości pojemności składowych w modelu układu izolacyjnego [14]. Wyładowania wywołują spadek napięcia na badanym

układzie wielokrotnie mniejszy od napięcia probierczego. Jednocześnie czas trwania pojedynczego *wnz* jest rzędu od 9-10 do 6-10 sekund i zależy od ośrodka, w którym *wnz* zachodzi. Pomiar ładunku pozornego sprowadza się do tak zwanej quasi-integracji sygnału prądowego [14]. Jest to możliwe dzięki szerokiemu widmu generowanemu przez pojedynczy impuls *wnz* – widmo od kilkuset kHz do ponad 1 GHz [14].

Każdy mechanizm uszkodzeń izolacji posiada swoje odbicie w obrazie wyładowań niezupełnych. Dlatego wykrycie tego obrazu może pomóc w określeniu, który rodzaj mechanizmu uszkodzeń jest dominujący [3, 4, 6]. Podczas praktyki diagnostycznej można spotkać cały szereg innych obserwacji *wnz*, bardzo trudnych w ocenie i które stanowią przedmiot wielu badań wyjaśniających [1, 3, 6, 13, 14].

Detekcja sygnałów *wnz*, szczególnie w warunkach przemysłowej eksploatacji, jest związana z takimi problemami jak [14]:

- zakłócenia, które powodują, że stosunek sygnału użytecznego do szumu może mieć małą wartość,
- wpływ kształtu napięcia, ważny przy rejestracji sygnałów wyładowań z rozdzielczością fazową w okresie napięcia probierczego.

Problem drugi może wynikać na przykład z przepięć łączeniowych lub z obecności harmonicznych napięcia zasilającego, przenikających do obwodu napięcia probierczego układu pomiarowego *wnz*. Harmoniczne napięcia probierczego, poprzez modulowanie jego kształtu, zmieniają warunki inicjowania wyładowań, wynikające z wartości chwilowych napięcia [13, 14].

W literaturze [1, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 11, 14] przedstawiony jest pogląd, że sygnały *wnz* zmierzone na badanej maszynie 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.

Pomiary emisji *wnz* realizuje się przy użyciu aparatury skutecznie ograniczającej wpływ szumów i zakłóceń na wynik pomiaru. Stosowana obecnie aparatura jest fabrycznie wyposażona w system ograniczania wpływu zakłóceń na wyniki pomiarów *wnz*. Podczas pomiarów w sposób ciągły na bieżąco wykorzystuje ona me-

tody ograniczenia wpływu zakłóceń, poprzez między innymi:

- 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 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 ciągły poziomu zakłóceń w miejscu pomiaru w tzw. kanale pomiaru szumu.

Pomiar zakłóceń powinien być realizowany w całym okresie badań w sposób ciągły. Czujnik RTD należy zamontować na zewnątrz badanej maszyny w jej bliskim otoczeniu. 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.

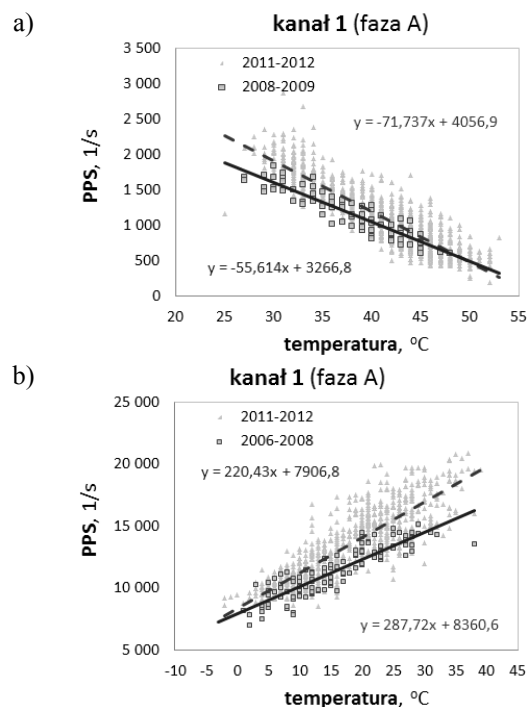
Wielu autorów [1, 3, 4, 8, 9, 11, 14] zwraca szczególną uwagę na konieczność uwzględniania przy poprawnej interpretacji wyników pomiarowych wpływu warunków mikroklima-

tycznych. Wykazują, że obserwowane trendy zmian wskaźników oceniających poziom aktywności *wnz* zmieniają się na tyle istotnie wraz ze zmianą temperatury i wilgotności, że utrudnia to obiektywną ocenę wyników.

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

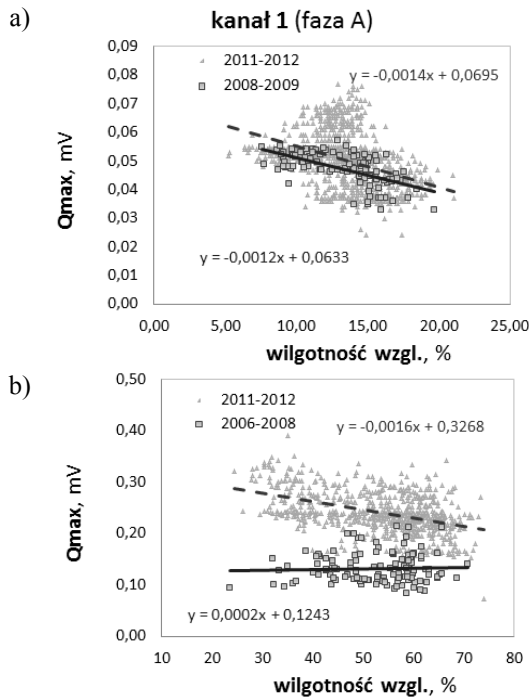
Analiza własnych badań autorów jak również wnioski wynikające z licznych publikacji [1, 3, 4, 8, 9, 11, 14] świadczą o tym, że temperatura i wilgotność powietrza wpływa na wielkość emisji *wnz* oraz na okresową zmianę lokalizacji wzmożonej aktywności wyładowań w układzie izolacyjnym. Wzrost temperatury w większości układów izolacyjnych powoduje chwilowe zmniejszenie emisji *wnz* wykazując na tzw. korelację ujemną. 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. Obserwacja pomiaru emisji *wnz* w przypadku jednego z badanych silników wskazuje, że wewnątrz izolacji znajdują się inkluzje gazowe. Dodatkowo w okresie trzech lat nastąpił ich ilościowy i jakościowy wzrost – świadczy o tym wzrost kąta nachylenia korelacji liniowej (rys.1a).

Można spotkać również maszyny, które wykazują na inne cechy układu izolacyjnego. Obserwuje się w nich, że wzrost temperatury powoduje wzrost emisji *wnz* (rys.1b). 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 [1, 14].



Rys. 1. Przykładowe korelogramy wpływu temperatury na intensywność *wnz* maszyn: a) korelacja ujemna, b) korelacja dodatnia [13].

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 badaniach własnych autorów, że w niektórych sytuacjach wpływ wilgotności powoduje okresowe wahania emisji *wnz* sięgające aż 250÷300% (rys.2). Wraz z upływem czasu, wpływ wilgotności na emisję *wnz* jest coraz większy. Na rys. 2 porównano wpływ wilgotności względnej na amplitudę *wnz*. Wyniki pomiarów pochodzą 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.



Rys. 2. Wpływ wilgotności bezwzględnej na intensywność wnz badanych maszyn: a) korelacja ujemna, b) korelacja dodatnia [13]

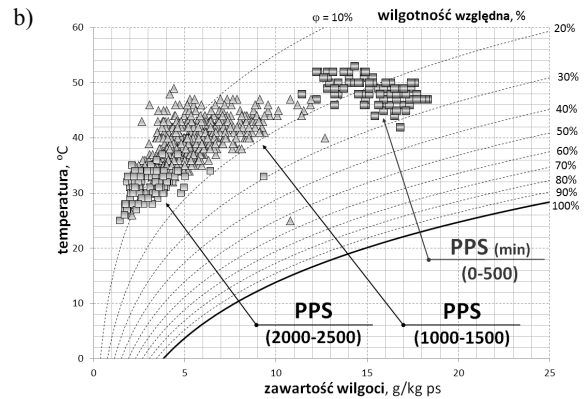
5. Komfort maszyn elektrycznych

Wyniki wielu badań wskazują, iż każda z maszyn może w inny sposób reagować na panującą w jej otoczeniu warunki mikroklimatyczne.

Dokonanie oceny wpływu mikroklimatu na emisję wnz w sposób uwzględniający łączne oddziaływanie parametrów środowiska najlepiej jest przedstawić na wykresach psychometrycznych powietrza wilgotnego (rys.3) [13]. Jeśli dane pomiarowe pogrupuje się względem wartości poszczególnych wskaźników oceny wnz, otrzyma się obszary występowania wskaźników o zbliżonej najniższej i najwyższej wartości. Uzyskane obszary różnią się pod względem kształtu, wymiarów oraz gęstości występowania danych w badanym obszarze. Dodatkową cechą jest wzajemne przenikanie tych obszarów.

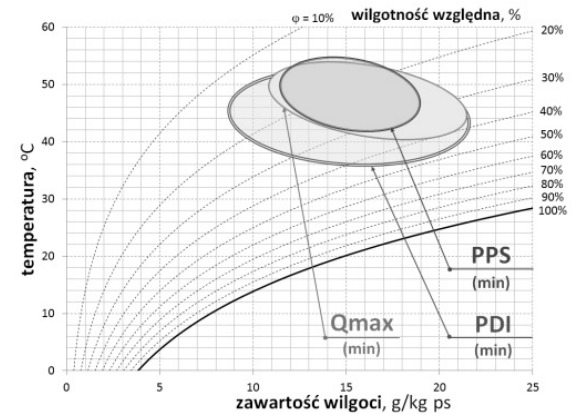
Uzyskane wyniki wskazują, iż można w ten sposób wyznaczyć warunki mikroklimatyczne, w których poziom aktywności wnz może zostać zredukowany do bardzo niskiego poziomu. Ważne jest, aby warunki mikroklimatyczne, przy których następuje wyraźna redukcja emisji wnz nie wpływały negatywnie na pozostałe parametry eksploatacyjne maszyn elektrycznych. Chodzi tu głównie o zachowanie wysokiej sprawności przy jednoczesnym realizowaniu

nadrzędnej funkcji, jaką jest zapewnienie wymaganego momentu napędowego. Niedopuszczalne jest również przekraczanie maksymalnej temperatury uzwojeń określonych przez producenta.



Rys. 3. Obszary występowania różnej aktywności wnz ze względu na wskaźnik emisji PPS [13].

Redukcja poszczególnych wskaźników emisji wnz następuje przy nieco innych parametrach mikroklimatycznych. Biorąc pod uwagę wszystkie opisane wyżej uwarunkowania, obszar zalecanych parametrów środowiskowych proponuje się ustalić poprzez wyznaczenie części wspólnej obszarów określonych indywidualnie dla każdego ze wskaźników emisji wnz. Wyniki tak przeprowadzonej analizy dla jednej z maszyn przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Wyznaczenie zalecanych parametrów mikroklimatu ze względu na emisję wnz - silnik SE-2 [13].

Dzięki wyznaczeniu zależności opisującej wpływ zmian temperatury i wilgotności powietrza na emisję wnz można wyznaczyć tak zwane warunki „komfortu cieplnego maszyn elektrycznych”. Autorzy proponują takie określenie dla wyrażenia temperatury i wilgotności powie-

trza, przy których poziom emisji *wnz* jest na „niskim” poziomie.

5. Podsumowanie

Dzięki zastosowaniu nowych metod pomiaru emisji *wnz* podczas pracy maszyn elektrycznych w połączeniu z pomiarami mikroklimatu możliwe jest wyznaczenie warunków komfortu cieplnego, czyli takich warunków przy których poziom aktywności *wnz* jest na bardzo niskim poziomie. Autorzy w swoich badaniach określili takie warunki dla kilku badanych maszyn dzięki przyjęciu własnego kryterium. Założono w nim, że w warunkach komfortu cieplnego średni poziom emisji *wnz* nie powinien przekroczyć 25% średniej wartości wyładowań obserwowanych obecnie, czyli w okresie kiedy warunki mikroklimatu w pomieszczeniach pracy tych maszyn nie są normowane. Wyznaczenie warunków komfortu cieplnego dokonano na wykresach psychometrycznych powietrza wilgotnego wskazując obszary występowania odpowiednio niskiej emisji *wnz*. Przy wyznaczaniu obszarów komfortu wzięto pod uwagę podstawowe wskaźniki oceniające aktywność *wnz* czyli *PPS*, Q_{max} i *PDI*. Analizy wyboru warunków komfortu wykonano dla izolacji, którą cechował najwyższy poziom emisji *wnz* w danej maszynie.

7. 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., Daffey K.: *Partial Discharge Monitoring in Marine HV Systems*. IMAREST 2011.
- [11]. Plutecki Z.: *Analiza zjawisk cieplno-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.

Autorzy

dr. hab. inż. Zbigniew Plutecki
 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,
z.plutecki@po.opole.pl,
s.szymaniec@po.opole.pl

Recenzent

prof. dr hab. inż. Roman Krok