

Zbigniew Plutecki, Sławomir Szymaniec  
Politechnika Opolska, Opole

## WYZNACZANIE WARUNKÓW KOMFORTU CIEPLNEGO MASZYN ELEKTRYCZNYCH NA PODSTAWIE POMIARU WNZ

### DETERMINING THE ELECTRICAL MACHINES THERMAL COMFORT BY MEASUREMENT OF PD ACTIVITY

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono 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 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 stanowiących odpowiedzialne napędy z punktu widzenia realizowanych procesów technologicznych są poddawani ciągłej presji otoczenia wynikającej z coraz większych oczekiwań w zakresie wysokiej efektywności i niezawodności pracy tych urządzeń.

W celu sprostania oczekiwaniom, wielu użytkowników stosuje narzędzia do ciągłej obserwacji stanu technicznego swoich maszyn podczas ich normalnej eksploatacji [5, 13, 14]. Systemy te są najczęściej stosowane do monitorowania i diagnozowania stanu łożysk tocznych jako tych elementów, które zużywają się najszybciej [14]. Coraz częściej monitoring stanu technicznego maszyn elektrycznych jest stosowany 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 niezupełnych w diagnostyce maszyn elektrycznych

Pomiar emisji wyładowań niezupełnych podczas eksploatacji maszyn dostarcza cennych informacji o jakości technologii wykonania maszyny i o aktualnym stanie układów izolacyjnych jej uzwojeń. Śledzenie zmian *wnz* w długich okresach czasu, dzięki zastosowaniu sys-

temów monitorowania *on-line*, pozwala śledzić proces starzenia układów izolacyjnych i dzięki temu odpowiedzialnie planować przerwy serwisowe, remontowe i modernizacyjne [10, 13, 14].

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*.

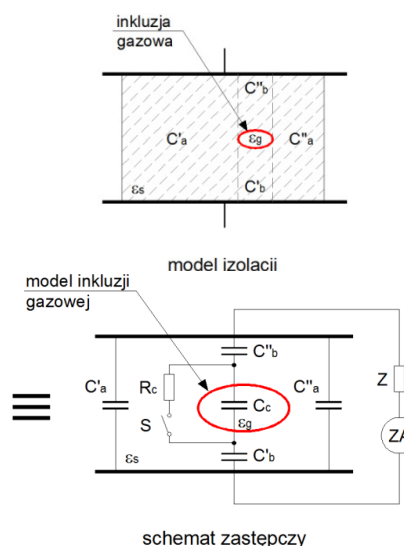
Gdy izolacja ulega degradacji, częstość i intensywność *wnz* wzrasta [3, 6, 7, 14]. W dużych generatorach i silnikach wysokiego napięcia próby oceny stanu uzwojeń poprzez rejestrację *wnz* są z powodzeniem realizowane już od drugiej połowy ubiegłego wieku [3, 6]. Choć wielkość impulsów *wnz* nie przekłada 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]. Rezultatem tych prac jest cały czas rozszerzana oferta komercyjnych systemów do pomiaru i monitoringu *wnz*. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć systemy firm *Iris*, *Eaton*, *Adwel* czy *Vibrocenter* [1, 4, 6, 14]. Firmy te preferują systemy przeznaczone do pomiaru *wnz* podczas normalnej pracy maszyn elektrycznych (systemy *on-line*).

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 prądowym 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, 8, 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]. Najczęściej rozpatrywany jest schemat zastępczy układu izolacyjnego z pojedynczą małą inkluzją gazową, przedstawiony na rys. 1 [8].



Rys. 1. Model układu izolacyjnego ze źródłem *wnz* w postaci inkluzji gazowej wraz ze schematem zastępczym [8]

gdzie:

$\epsilon_s$  - przenikalność elektryczna dielektryka izolacji,

$\epsilon_g$  - przenikalność elektryczna inkluzji gazowej,

$C_c$  - pojemność inkluzji gazowej (kawerny),

$C'a, C''a$  - pojemności składowe równoległe do źródła *wnz* w układzie izolacyjnym,

$C'b, C''b$  - pojemności składowe szeregowo z inkluzją gazową,

$RC$  - zastępcza rezystancja kanału wyładowania w jego źródle,

$S$  - łącznik sterowany wartością pola elektrycznego w źródle wyładowań.

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 niezupełnych wykorzystuje się wskaźniki określające: intensywność wyładowań rejestrowaną w jednej sekundzie (*PPS*), amplitudę wyładowań w mV (*Q<sub>max</sub>*) oraz moc wyładowań w mW (*PDI*).

### 3. Wpływ mikroklimatu na emisję wnz

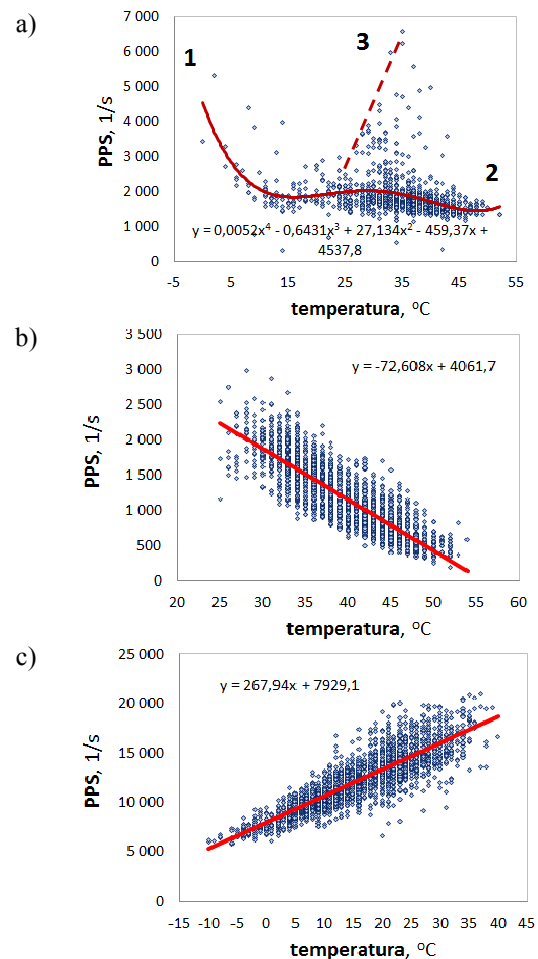
Warunki środowiska w jakich pracują maszyny elektryczne determinują czas ich bezawaryjnej eksploatacji [3, 4, 9, 11, 12, 13]. Wielu autorów wskazuje, że nie przestrzeganie wymagań producentów, w tym zakresie, może prowadzić do przegrzewania się uzwojeń, nie dotrzymywania deklarowanych parametrów eksploatacyjnych, obniżenia sprawności, czy w dłuższym okresie czasu do przedwczesnego starzenia się układów izolacyjnych uzwojeń [3, 8, 14].

Biorąc pod uwagę powyższe argumenty, maszyny elektryczne powinny pracować w pomieszczeniach, w których świadomie kształtowane są warunki środowiskowe, w sposób uwzględniający aktualny stan pracy tych urządzeń bez względu na zmieniające się zewnętrzne warunki klimatyczne. Niestety doświadczenia autora wskazują, że w warunkach przemysłowej eksploatacji bywa często inaczej. Przyczyny uszkodzeń maszyn elektrycznych wg IIES i EPRI są w dużym stopniu związane z oddziaływaniem otoczenia w jakich pracują maszyny. Udział tych czynników szacowany jest odpowiednio na 38,7 i 32% [12]. W tym, wpływ zbyt wysokiej temperatury, za niskiej lub zbyt wysokiej wilgotności względnej powietrza oraz nieprawidłowego przewietrzania izolacji uzwojeń silników, wynosi aż 12.7% [12].

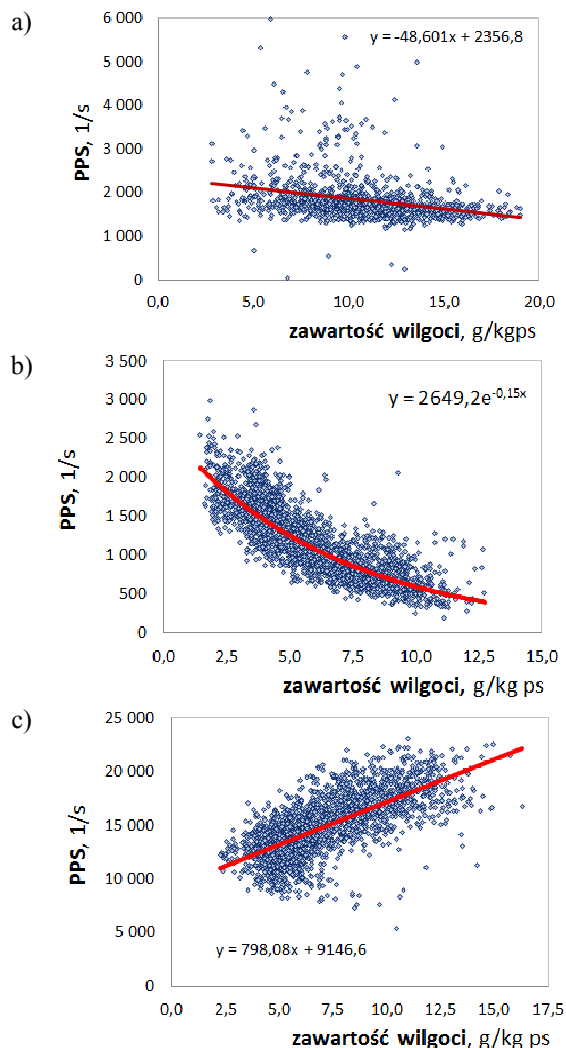
Temperatura wpływa na starzenie się izolacji wówczas, gdy jest zbyt wysoka, ale również, gdy jest zbyt niska. Wpływ temperatury na starzenie się wytrzymałości układu izolacyjnego zależy w dużym stopniu od rodzaju układu elektroizolacyjnego. Wpływ temperatury powietrza w pomieszczeniu na wielkość emisji wyładowań niezupełnych określony dla różnych maszyn przedstawiono na rysunku 2 [13]. Wybrane parametry techniczne badanych maszyn przedstawiono w tabeli 1. Przyjęty w tabeli sposób oznaczeń wykorzystano również do późniejszego przedstawiania wyników badań.

Tabela 1. Charakterystyka techniczna badanych maszyn [13]

Lp.	Parametr	SE-1	SE-2	SE-3
1	przeznaczenie	silnik	Silnik	generator
2	typ	SYUe-148r	AMS 800 LC	HXRG 450
3		indukcyjny	indukcyjny	indukcyjny
4	moc znamionowa	1.0 MW	9.0 MW	0.715 MW
5	napięcie	6.0 kV	6.0 kV	6.0 kV
6	prąd	120 A	881 A	68.7 A
7	częstotliwość	50 Hz	50 Hz	50 Hz
8	prędkość obrotowa	738 obr/min	1500 obr/min	3600 obr/min
9	klasa izolacji	B / taśmy mikowe	F / micadur compact ®	F / micadur compact ®
10	technologia wykonania izolacji	Resin-Rich	VPI	VPI
11	konstrukcja obudowy	otwarta	zamknięta	zamknięta
12	chłodzenie	powietrzne	powietrzne / wodne	powietrzne / powietrzne



Rys. 2. Wpływ temperatury na intensywność wnz badanych maszyn: a) SE-1, b) SE-2, c) SE-3 [13]



Rys. 3. Wpływ wilgotności bezwzględnej na intensywność *wnz* badanych maszyn: a) SE-1, b) SE-2, c) SE-3 [13]

Wyniki badań wskazują, iż każda z badanych maszyn w inny sposób reaguje na panujące w jej otoczeniu warunki mikroklimatyczne. Izolacja uzwojeń silnika SE-1 w najmniejszym stopniu wykazuje cechy izolacji, w której emisja *wnz* zależy od warunków mikroklimatycznych. Emisja *wnz* w izolacji tego silnika wyraźnie wzrasta, gdy spada wilgotność względna powietrza poniżej 20%. Pozostałe maszyny są wyposażone w izolację uzwojeń silnie reagującą na zmiany mikroklimatu. W przypadku silnika SE-2, mimo zamkniętej budowy i stosunkowo małych zmian mikroklimatu, aktywność *wnz* w bardzo dużym stopniu zależy od warunków środowiskowych.

Analiza wpływu poszczególnych parametrów mikroklimatu na emisję *wnz* pozwala wskazać trendy jakie się kształtują między tymi parametrami, a wskaźnikami oceniającymi poziom

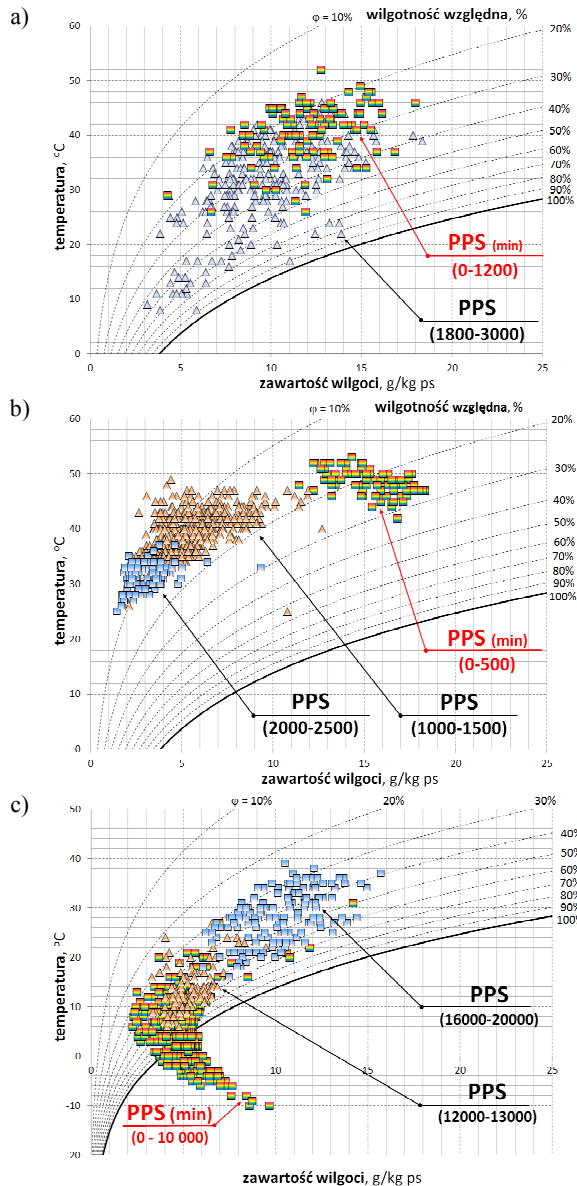
wyładowań niepełnych w izolacji badanych maszyn. Wykazując te zależności wskazano jednocześnie na możliwość ograniczania wielkości emisji *wnz* poprzez wskazanie warunków mikroklimatu, przy których poziom emisji *wnz* jest najmniejszy. Można tego dokonać indywidualnie, analizując wpływy poszczególnych parametrów mikroklimatu. Chcąc jednak zachować należyta staranność oceny oraz mając na względzie wskazanie zalecanych warunków mikroklimatycznych dla eksploatacji maszyn, autor proponuje przeprowadzenie analizy wpływu mikroklimatu na wielkość emisji *wnz* łącznie trzech parametrów mikroklimatu, tj. temperatury, wilgotności względnej oraz zawartości wilgoci w powietrzu.

Dokonanie oceny wpływu mikroklimatu na emisję *wnz* w sposób uwzględniający łączne oddziaływanie powyższych parametrów najlepiej jest przedstawić na wykresach psychometrycznych powietrza wilgotnego. W tym celu dane pomiarowe pogrupowano względem wartości poszczególnych wskaźników oceny *wnz*, przyjmując kryterium podziału na cztery grupy. Tak podzielone dane naniesiono na wykresy psychometryczne, różnicując je kolorem i kształtem znaczników. Dla zapewnienia czytelności prezentowania wyników na wykresach przedstawiono po trzy lub dwa, w przypadku silnika SE-1, zakresy dla każdej z badanych wielkości. W ten sposób otrzymano obszary występowania wskaźników o zbliżonej wartości. Poniżej przedstawiono i omówiono uzyskane wyniki tak przeprowadzonej analizy.

Wyniki grupowania danych pomiarowych względem liczebności wyładowań (*PPS*) przedstawiono na rysunku 4. Dla każdej z badanych maszyn obszar występowania zbliżonych wartości wskaźnika *PPS* występuje w nieco innym miejscu wykresu. Obszary te różnią się pod względem kształtu, wymiarów oraz gęstości występowania danych w badanym obszarze. Dodatkową cechą jest wzajemne przenikanie tych obszarów.

Występowanie obszarów o najbardziej zwartym kształcie i dużej gęstości jest cechą charakterystyczną silnika SE-2. Obszar występowania najmniejszych wartości *PPS* jest stosunkowo mały i zawiera się między temperaturą 42 i 53°C oraz między udziałem wilgoci w powietrzu 12 i 18g/kgps. Odpowiada to zmianie wilgotności względnej w przedziale 15 i 30%. Obszar ten wyraźnie odstaje od pozostałych obszarów, w których wyładowania są znacznie ak-

tywne. Wyraźny jest również obszar występowania wzmożonej aktywności wnz, który mieści się w granicach  $25 \div 35^\circ\text{C}$ ,  $2 \div 5 \text{ g/kgps}$  oraz  $5 \div 15\%$ . Z tego punktu widzenia warunki mikroklimatyczne w tym obszarze najbardziej sprzyjają generacji wyładowań.



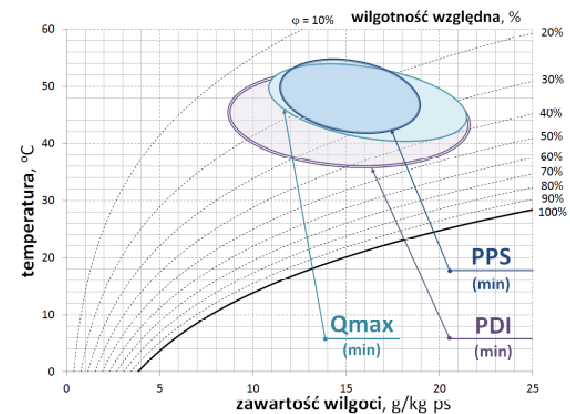
Rys. 4. Obszary występowania różnej aktywności wnz ze względu na wskaźnik emisji PPS: a) silnik SE-1, b) silnik SE-2, c) generator SE-3 [13]

#### 4. Komfort cieplny maszyn elektrycznych

Uzyskane wyniki analizy wieloparametrycznej dowodzą istnienia takich warunków mikroklimatycznych, w których poziom aktywności wnz może zostać zredukowany do bardzo niskiego poziomu. Ważne jest, aby warunki mikroklimatyczne, przy których następuje wyraźna re-

dukcja 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.

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 5.



Rys. 5. 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. Autor [13] proponuje takie określenie dla wyrażenia temperatury i wilgotności powietrza, przy których poziom emisji wnz jest na „niskim” poziomie. Na obecnym poziomie wiedzy bardzo trudne jest zdefiniowanie granicznego poziomu wyładowań, od którego można uznać, że warunki są już komfortowe. Za takie kryterium można by przyjąć kryterium ekonomiczne, w którym należałoby określić maksymalne koszty jakie można ponosić z tytułu pracy urządzeń grzewczo-wentylacyjnych w celu zapewnienia warunków komfortu i uzyskanie korzyści finansowej z przedłużonej eksploatacji maszyny. Trudność polega jednak na wyznaczeniu krzywej starzenia się izolacji w funkcji zmian

temperatury i wilgotności. Wiedzę taką będzie można osiąść dopiero po zbadaniu co najmniej kilku pełnych cykli „życia izolacji” w maszynach o zbliżonych rozwiązaniach konstrukcyjnych i pracujących w podobnych warunkach.

## 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 każdej z trzech badanych maszyn dzięki przyjęciu własnego kryterium. Założono w nim, że w warunkach komfortu cieplnego średni poziom emisji *wnz* nie przekroczy 25% średniej wartości wylądowań obserwowanych obecnie, czyli w okresie kiedy warunki mikroklimatu 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 wszystkie wskaźniki oceniające aktywność *wnz*, czyli *PPS*, *Q<sub>max</sub>* i *PDI*. Analizy wyboru warunków komfortu wykonano dla izolacji, którą cechował najwyższy poziom emisji *wnz* w danej maszynie.

## 6. 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*, 75<sup>th</sup> Annual International Doble Client Conference, 2008.
- [5]. Doble engineering Company: *Application for PD Monitoring on Generators*, 76<sup>th</sup> 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 34<sup>th</sup> Annual Meeting, Oct 3-7, '99, Phoenix, AZ.
- [7]. Green V.: *Results from US Utilities Using New Instrument for Continuous On-Line Partial Dis-*

*charge Measurement*. Fourth Int. Conf. on Generator and Motor Partial Discharge Testing, Houston, Texas. USA.

- [8]. Florkowska B, Florkowski M., Włodek R., Zydróń P.: *Mechanizmy, pomiary i analiza wylądowań niezupełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia*. Wyd. IPPT PAN, Warszawa 2001.
- [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 wylądowań niezupełnych w maszynach elektrycznych*, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne. Nr 95 (2/2012), 2012r., s. 147-152.
- [13]. Plutecki Z.: *Analiza wpływu mikroklimatu na emisję wylądowań niezupełnych 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. inż. Zbigniew Plutecki

Politechnika Opolska

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki. Instytut Elektrotechniki Przemysłowej i Diagnostyki. 45-758 Opole ul. Prószkowska 76 z.plutecki@po.opole.pl

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. 1  
s.szymaniec@po.opole.pl