

*maszyny indukcyjne wysokiego napięcia,
wyładowania niezupełne, zjawiska cieplno-przepływowe, mikroklimat*

Sławomir SZYMANIEC*
Zbigniew PLUTECKI*

WPLYW WARUNKÓW OTOCZENIA NA EMISJĘ WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH W MASZYNACH ELEKTRYCZNYCH

W artykule przedstawiono wyniki badań własnych obejmujących długookresowe pomiary warunków środowiska, w którym pracuje silnik indukcyjny pierścieniowy wysokiego napięcia dużej mocy i jego wpływ na emisję wyładowań niezupełnych. Badania przeprowadzono w warunkach przemysłowych mierząc: temperaturę powietrza, temperaturę promieniowania, prędkość ruchu powietrza, wilgotność względną powietrza oraz wielkość zapylenia powietrza pyłem cementowym. Mierzone w sposób ciągły parametry wyładowań niezupełnych to: intensywność wyładowań (PDI), amplituda wyładowań (Q_{max}), oraz liczba impulsów wyładowań na 1 sekundę (PPS). Przeprowadzona analiza bogatego materiału pomiarowego, poprzez wykorzystanie elementów obróbki statystycznej, pozwoliła na wskazanie wpływu ww. wielkości środowiska na wybrane parametry wyładowań. Na ich podstawie określono zalecane warunki środowiska, jakie należy kształtować w otoczeniu pracujących maszyn elektrycznych.

1. WSTĘP

Pomiary wyładowań niezupełnych (wnz) stają się powoli podstawowym elementem programu badań maszyn elektrycznych. Dzięki pomiarom wnz wykonywanym w czasie ruchu maszyny (pomiary *on-line*) dostajemy cenne informacje o jakości technologii wykonania maszyny i o aktualnym stanie układów izolacyjnych jej uzwojeń [9, 11]. Śledzenie zmian wnz w długich okresach czasu, dzięki zastosowaniu systemów monitorowania *on-line*, pozwala śledzić proces starzenia układów izolacyjnych i dzięki temu odpowiedzialnie planować przerwy serwisowe, remontowe i modernizacyjne [1, 3, 5, 10].

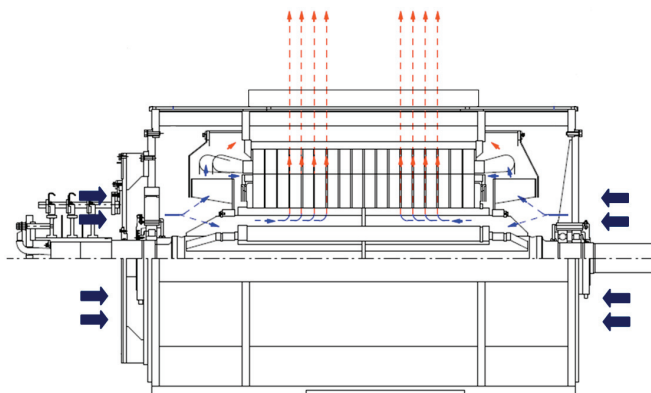
* Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i informatyki, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, s.szymaniec@po.opole.pl

Jak wskazują dotychczasowe badania, na wielkość i intensywność emisji wnz oprócz stanu izolacji mają również wpływ czynniki zewnętrzne [9,11,13]. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć czynniki wynikające z opisu stanu równowagi termokinetycznej osiągananej między układem elektrycznym silnika a warunkami otoczenia w jakich silnik pracuje. Opis stanu warunków otoczenia to przede wszystkim temperatura i wilgotność powietrza, stopień zanieczyszczenia (np. zapylenia) określany na granicach osłony bilansowej.

Poniżej autorzy przedstawiają wyniki własnych badań realizowanych na silniku indukcyjnym pierścieniowym wysokiego napięcia dużej mocy, stanowiącym napęd krytyczny cementowni. Głównym celem tych badań jest określenie jakościowego i ilościowego wpływu wielkości otoczenia na emisję wnz w różnych warunkach pracy. Na tej podstawie wskazano właściwe warunki środowiskowe dla pracy silnika.

2. CHARAKTERYSTYKA BADANEGO SILNIKA

Obiektem badań jest silnik o mocy 1 MW; napięciu 6 kV, 50 Hz; prędkości obrotowej 738 obr/min; napięciu wirnika 1140 V; prądzie wirnika 560 A; stopniu ochrony silnika 44IP; klasie izolacji „B”. Silnik o budowie otwartej z przewietrzaniem przelotowym osiowo promieniowym (rys. 1). Wymagany strumień powietrza chłodzącego $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ($9000 \text{ m}^3/\text{h}$). Dopuszczalna temperatura otoczenia dla poprawnej pracy silnika według zaleceń producenta to $40 \text{ }^\circ\text{C}$.



Rys. 1. Schemat przewietrzania silnika SYUe-148r
Fig. 1. The motor SYUe-148r ventilation scheme

Powietrze do przewietrzania silnika jest pobierane bezpośrednio z otoczenia hali poprzez otwory w osłonach bocznych i kierowane częściowo między żebra szkieletu wirnika, skąd przez kanały przechodzi do otworów wylotowych, a częściowo prze-

chodzi przez uzwojenia stojana i przez przestrzeń między żebrami i kadłubem. Po podgrzaniu w silniku powietrze jest kierowane na zewnątrz bezpośrednio do hali. Powietrze, ze względu na rodzaj badanego obiektu, jest zanieczyszczone drobnymi cząstkami stałymi pyłu cementowego.

3. INSTALACJA POMIAROWA

Pomiary wyładowań niepełnych zostały zrealizowane przy wykorzystaniu systemu monitoringu *on-line*, w skład którego wchodzi: urządzenie R500 firmy *Vibrocenter*, 9 czujników DRTD-3 współpracujących z termorezystorami Pt100 zamontowanymi w uzwojeniach stojana silnika, 1 czujnik RFTC zabudowany na przewodzie neutralnym oraz 1 czujnik temperatury powietrza i 1 czujnik wilgotności względnej powietrza zamontowane w pobliżu badanego silnika. Urządzenie R500 posiada ponadto 1 kanał szumów i 2 dodatkowe kanały umożliwiające pomiar natężenia prądu i napięcia. Wszystkie kanały są izolowane, posiadają zabezpieczenia przepięciowe oraz filtry górnych częstotliwości. Przyrząd R500™ rejestruje impulsy o częstotliwości z zakresu 1 MHz÷20 MHz. Schemat blokowy układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 2.

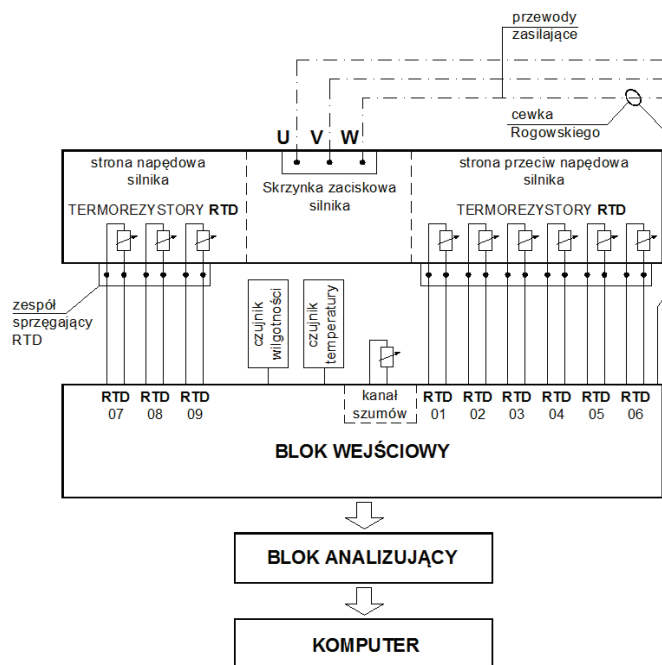
Badany silnik, podczas okresowego remontu w 2009 roku, został wyposażony w dodatkowych 9 termorezystorów Pt100, które zainstalowano pod klinami w złobkach stojana. Lokalizację ich zabudowy przedstawiono na rysunku 3.

Termorezystory w układzie pomiarowym pełnią funkcję anten częstotliwości radiowych, które rejestrują wyładowania niepełne i przesyłają sygnał do zespołu antenowego. Zespół ten jest odpowiedzialny za filtrowanie oraz galwaniczną separację [11]. Sygnał następnie przesyłany jest dalej do układu monitorującego wyładowania niepełne [11]. Czujniki mierzą wyładowania niepełne w zakresie częstotliwości 1÷20 MHz.

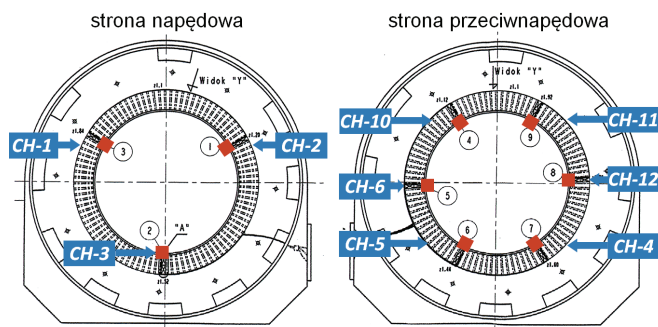
Do kontroli i rejestracji wyładowań niepełnych w przewodzie neutralnym wykorzystano czujnik RFCT firmy *Vibrocenter*. Jego wyboru dokonano w oparciu o uwarunkowania określone przez producenta. Zastosowany czujnik charakteryzuje się bardzo dużą czułością na wysokoczęstotliwościowe impulsy wyładowań niepełnych z przedziału od 0,5 MHz do 50 MHz [10, 11].

Zastosowany system pomiarowy pozwala mierzyć następujące parametry wyładowań niepełnych: aktywność wyładowań przy danej polaryzacji impulsów zorientowaną w przebiegu fazowym napięcia, intensywność wyładowań (PDI), amplitudę wyładowań (Q_{max}), liczbę impulsów wyładowań mierzoną w ciągu 1 sekundy (PPS).

Właściwe pomiary wnz rozpoczęto po przeprowadzeniu indywidualnej kalibracji poszczególnych torów pomiarowych, które wykonano przy wykorzystaniu kalibratora GKI-2 firmy *Vibrocenter*.



Rys. 2. Uproszczony schemat blokowy układu pomiarowego wnz silnika SYUe-148r
 Fig. 2. Simplified block diagram of the PD measuring system (SYUe-148r motor)

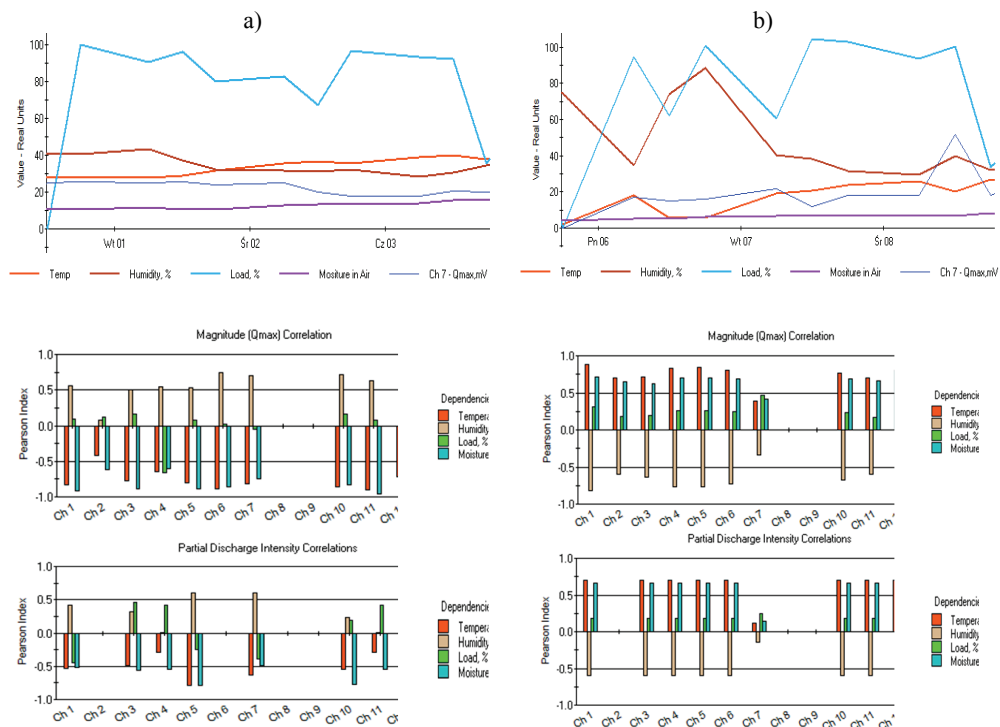


Rys. 3. Rozmieszczenie termorezystorów Pt100 w silniku SYUe-148r
 Fig. 3. Resistance thermometer Pt100 location in the motor SYUe-148r

Uzupełnienie systemu monitorującego emisję wnz stanowi oprogramowanie, które umożliwia skomunikowanie się z urządzeniem R500 celem dokonania zmian konfiguracyjnych oraz analizę otrzymanych wyników. Umożliwia również okresowe tworzenie raportów stanu izolacji [1, 3].

4. BADANIE WPŁYWU WARUNKÓW OTOCZENIA NA EMISJĘ WNZ

Właściwszym z punktu widzenia celu wydaje się analizowanie pojedynczych cykli pracy silnika w różnych warunkach otaczającego go środowiska [2, 4, 9, 12]. Na rysunku 4 przedstawiono wielkości wnz podczas pracy silnika w dniach letnich i zimowych oraz wzajemną korelację temperatury, wilgotności, obciążenia oraz zawartości wilgoci w powietrzu na amplitudę oraz intensywność wnz. Podczas pracy silnika w lecie obserwuje się związek między wzrostem temperatury a zmniejszeniem się amplitudy wyładowań, współczynnik korelacji osiąga 80-90%. Po przekroczeniu jednak temperatury 35 °C trend się zmienia i następuje wzrost wyładowań. Podczas pracy silnika zimą wzrost temperatury powietrza w zakresie 0÷20 °C powoduje wzrost amplitudy wnz. Natomiast obserwowany chwilowy spadek temperatury powietrza z 20 do 15 °C generuje dwukrotny wzrost amplitudy wnz.



Rys. 4. Przebieg zmian i korelacje wzajemne badanych wielkości, okres:
a) letni (01÷03.06.2010), b) zimowy (06÷08.12.2010)

Fig. 4. The changes measured parameters and correlation, at the:
a) summer time (01÷03.06.2010), b) winter time (06÷08.12.2010)

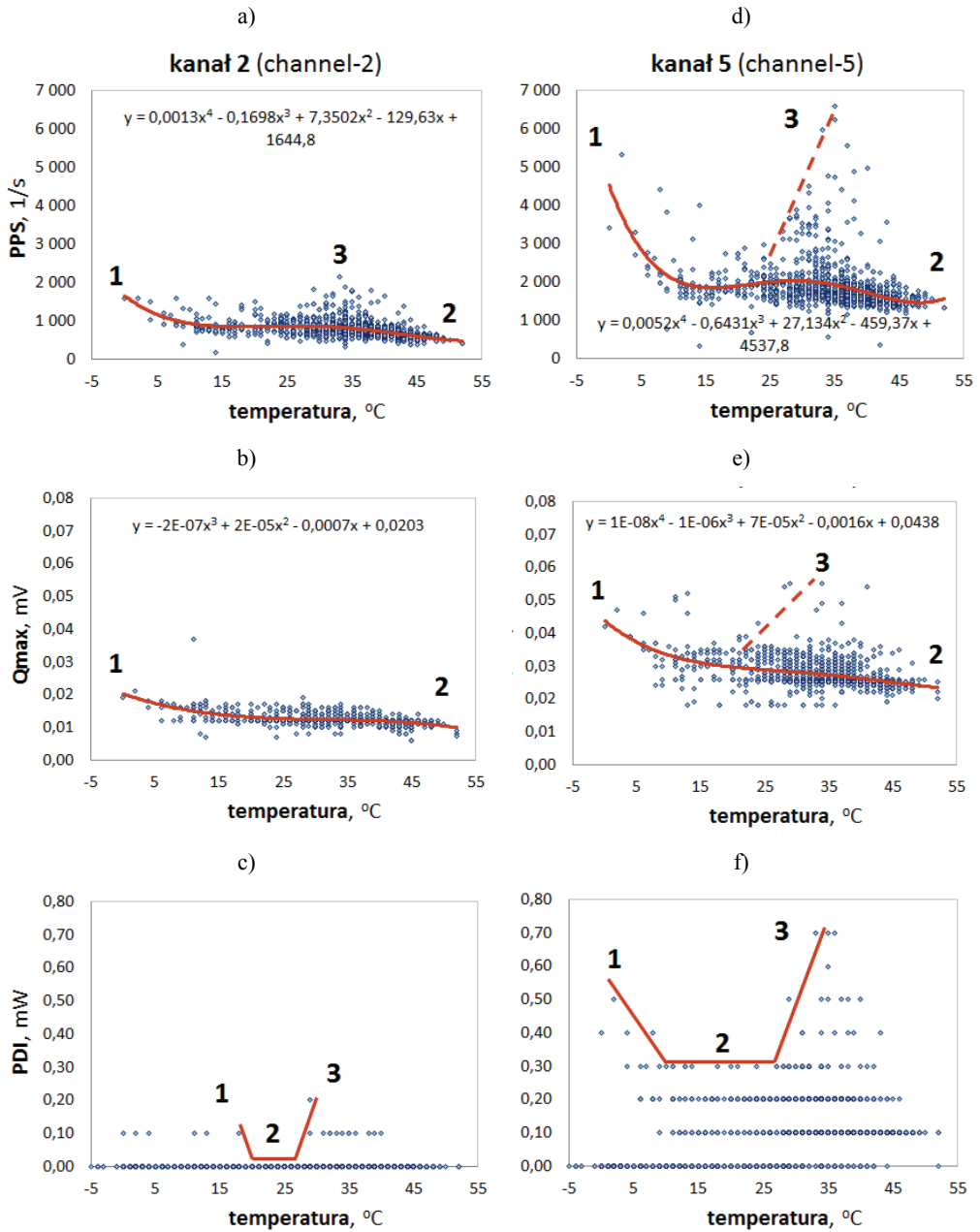
Związek między parametrami środowiska zewnętrznego a wielkościami opisującymi emisję wnz określony na dużej próbie pomiarowej (4 tys. pomiarów) przedstawiono na rysunkach 5÷6. Na pierwszym z nich przedstawiono rozkład intensywności wyładowań PPS, amplitudę wyładowań Q_{max} oraz wielkość wyładowań PDI w funkcji temperatury dla fazy A mierzone dwoma czujnikami zabudowanymi po stronie napędowej – kanał 2 (rys. 5a÷5c) i przeciw-napędowej – kanał 5 (rys. 5d÷5f). Z porównania zmierzonych wartości wynika, że emisja wnz po stronie przeciw-napędowej ma charakter bardziej intensywny. Obserwowane wskaźniki wnz są większe średnio o 2 razy, a okresowo nawet 6 krotnie.

Rozkład intensywności wyładowań PPS w funkcji temperatury powietrza wskazuje, że jeśli temperatura jest niższa od 10 °C następuje bardzo wyraźne nasilenie się wyładowań (rys. 5a i 5d – linia 1). Gdy temperatura powietrza wzrasta linia trendu wyznaczona poprzez aproksymację do funkcji wielomianowej wskazuje obniżanie się ilości wyładowań (rys. 5a, 5d – linia 2). Z pomiarów w tym zakresie wynika jednak, że występują chwile kiedy intensywność wyładowań wyraźnie wzrasta nawet 2,5 krotnie w stosunku do ilości impulsów rejestrowanych przy temperaturach 10÷20 °C. Ten wzrost bardzo wyraźnie obserwuje się przy temperaturach od 27 do 35 °C (rys. 5a, 5d – linia 3).

Zmianę współczynnika Q_{max} w funkcji temperatury powietrza przedstawiono na rysunku 5b i 5e. Wartość tego współczynnika odpowiada amplitudzie 10 zarejestrowanym wyładowaniom w ciągu 1 sekundy. Z tych przebiegów wynika, że również poniżej 10 °C następuje wyraźny wzrost wskaźnika Q_{max} (rys. 5b, 5e – linia 1). Wzrost temperatury wpływa na zmniejszenie się amplitudy wyładowań (linia 2). Obie linie mają podobny współczynnik kierunkowy co potwierdza obserwowany trend.

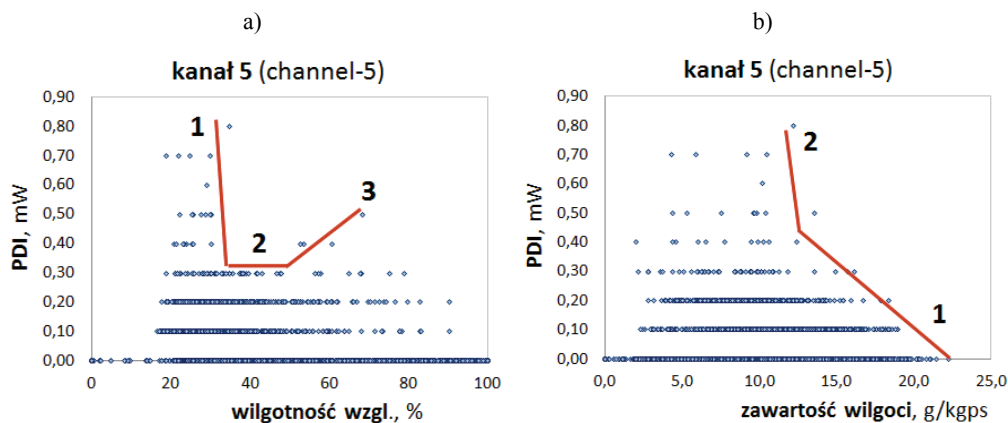
Bardzo ciekawe wnioski nasuwają się z obserwacji wpływu temperatury powietrza na wartość wyładowań PDI (rys. 5c, 5f). Wrysowane linie 1, 2 i 3 wskazują obszar, w którym wartość wyładowań jest na najniższym poziomie. W zakresie od 10 do 27 °C wyładowania nie przekraczają 0,3 mW po stronie P i 0,1 mW po stronie N. Spadek lub wzrost temperatury od wskazanego zakresu wpływa wyraźnie na wzrost wyładowań nawet o 2 razy (linia 1 i 3).

Wpływ wilgotności powietrza na emisję wyładowań przedstawiono na rysunku 6. Przedstawiono na nich wilgotność powietrza procentowo odnosząc się do wilgotności względnej (rys. 6a) i wartościowo – wyrażając zawartość wilgoci w powietrzu suchym (rys. 6b). Wyrażając wnz w funkcji zawartości wilgoci w powietrzu można wyciągnąć wniosek, że zarówno intensywność, amplituda jak i wielkość emisji jest mniejsza wraz ze wzrostem wilgotności. Świadczy to o tym, że wraz ze wzrostem wilgotności wzrasta pojemność cieplna powietrza a to poprawia intensywność wymiany ciepła między uzwojeniami stojana i wirnika oraz powietrzem chłodzącym (lepsza efektywność chłodzenia). Do nieco innych wniosków można dojść wyrażając emisję wyładowań w funkcji wilgotności względnej. Emisja wyładowań jest bardzo intensywna, gdy wilgotność względna spada poniżej 30% (rys. 6a – linia 1). Ale również wzrost wilgotności względnej powyżej 55% powoduje wzrost wyładowań (rys. 6a – linia 3).



Rys. 5. Wskaźniki emisji wnz dla fazy A:
 kanal 2 – strona napędowa, kanal 5 – strona przeciw-napędowa
 Fig. 5. The factors of PD emission, Phase A:
 Channel 2 – side drive, Channel 5 – side opposing drive

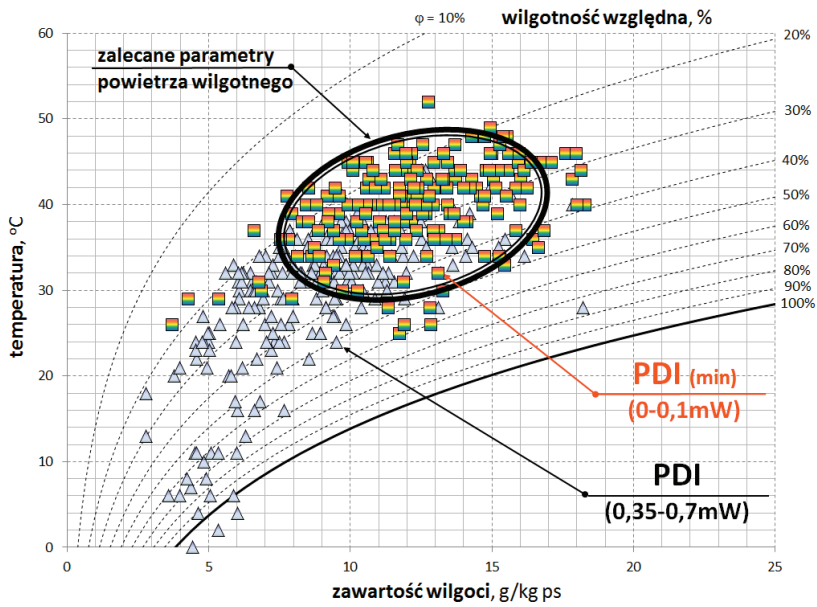
Przedstawiona do tej pory analiza oddzielnie rozpatrywała wpływ temperatury i wilgotności powietrza na emisję wyładowań. Stan dowolnego gazu jednoskładnikowego jest określony jednoznacznie termicznie, gdy znane są jego dwa parametry, np. ciśnienie i temperatura. Trzeci parametr można obliczyć z równania stanu. Natomiast do określenia stanu termicznego powietrza wilgotnego, który jest mieszaniną dwu gazów, potrzebna jest ponadto znajomość składu powietrza, np. zawartość wilgoci X . Narzędziem pomocniczym do rozwiązywania zagadnień występujących w praktyce, a w szczególności do obliczania bilansów procesów, służą wykresy powietrza wilgotnego. Najbardziej znane to: wykres *Moliera* opisujący stan powietrza we współrzędnych $h - X$ (h – entalpia, X – zawartość wilgoci) i wykres *Carriera* we współrzędnych $t - X$ (t – temperatura). Na wykresach tych pozostałe parametry, np. wilgotność względna φ są nanoszone w postaci rodzin linii parametrycznych.



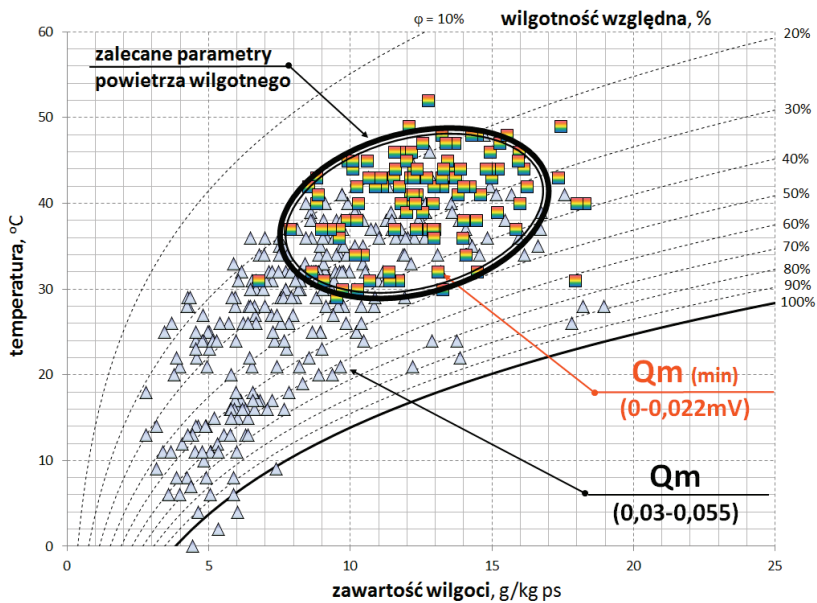
Rys. 6. Emisja wnz dla fazy A w funkcji: a) wilgotności względnej, b) zawartości wilgoci w powietrzu

Fig. 6. The PD emission, Phase A: a) relative humidity, b) moisture in air

Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono punkty opisujące stan termodynamiczny powietrza wilgotnego odpowiadające pomiarom wykonanym w bezpośrednim otoczeniu badanego silnika, przedstawione we współrzędnych wg wykresu *Carriera*. Punkty pomiarowe pogrupowano względem parametrów PDI i Q_{max} , dzięki czemu otrzymano rozkład odpowiadający najmniejszym i największym wartościom emisji wyładowań. Następnie dokonano wskazania obszaru, w którym przebieg wyładowań jest najmniej intensywny. Z przeprowadzonej analizy wynika, że najkorzystniejszymi warunkami środowiskowymi, przy których emisja wnz jest najmniejsza, to zapewnienie parametrów termicznych powietrza w zakresie: temperatury $t = 27 \div 45$ °C, wilgotności względnej $\varphi = 18 \div 50\%$ i zawartości wilgoci $X = 8 \div 17$ g/kg powietrza suchego.



Rys. 7. Emisja PDI na wykresie psychrometrycznym powietrza wilgotnego – fazy A, kanał 5
 Fig. 7. The PDI emission on the psychrometric chart of humid air – phase A, channel 5



Rys. 8. Amplituda $w_{nz} Q_{max}$ na wykresie psychrometrycznym powietrza wilgotnego – fazy A, kanał 5
 Fig. 8. The magnitude (Q_{max}) on the psychrometric chart of humid air, phase A, channel 5

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Przedstawiona w artykule tematyka obejmuje zagadnienia z zakresu diagnostyki stanu izolacji maszyn elektrycznych wysokiego napięcia oraz analizy wpływu zjawisk ciepłno-przepływowych i stanu termicznego otaczającego środowiska na intensywność emisji wyładowań niepełnych.

Z przeprowadzonych badań wynika jednoznacznie, że istnieje bezpośredni wpływ parametrów środowiska na emisję wyładowań niepełnych w badanym silniku. Celowym zatem jest, aby w pomieszczeniach napędów wysokiego napięcia ściśle normować warunki mikroklimatyczne, ograniczając w ten sposób emisję wyładowań do minimum. Biorąc pod uwagę przedstawione wyżej uwarunkowania właściwym jest podawanie wymaganych parametrów środowiskowych poprzez zdefiniowanie obszaru zalecanych parametrów wyrażony zakresem trzech parametrów stanu termicznego powietrza: temperatury, wilgotności względnej i zawartości wilgoci w powietrzu suchym. Zapewnienie wymaganych warunków otoczenia należy realizować poprzez system grzewczo-wentylacyjny [6, 7, 8]. O skuteczności pracy takich systemów, będzie decydował przyjęty system sterowania i automatyki, który powinien uwzględniać na bieżąco wpływ poszczególnych wielkości mikroklimatu na emisję wyładowań niepełnych. Do tego celu świetnie nadają się algorytmy wykorzystujące elementy predykcji zdarzeń [6].

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 Aplikac. 2003.
- [2] BENDAT J., PIERSOL A., *Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1976.
- [3] BERTENSHAW D., SASIC M., *On-line Partial Discharge Monitoring on MV motors – Case studies on Improved Sensitivity Couplers*, Nota Aplikacyjna firmy ADWEL International Canada, 2002.
- [4] DĄBROWSKI M., *Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, WNT, Warszawa 1994.
- [5] BLOKHINTSEV D., GOLOVKOV M., GOLUBEV A., KANE C., *Field Experiences on the Measurement of Partial Discharges on Rotating Equipment*, IEEE PES '98, February 1–5, Tampa, 1998.
- [6] KABZA Z., LICHOTA J., PLUTECKI Z., *Pomiary energetyczne dla potrzeb wyboru optymalnych warunków użytkowania budynków „Zrównoważonego Rozwoju”*, Raport końcowy do projektu badawczego PB Nr 8 T10C 006 19, Praca niepublikowana, Opole, styczeń 2003.
- [7] PLUTECKI Z., *Wieloparametryczna ocena warunków komfortu cieplnego*, PAK, 2011, nr 2.
- [8] PLUTECKI Z., *Analiza zjawisk ciepłno-przepływowych w ogrzewanym pomieszczeniu*, *Archiwum Energetyki*, tom XXXIII, 2004, nr 1–2, Wydawnictwo Komitetu Problemów Energetyki przy Prezydium PAN, Gdańsk 2004.

- [9] PLUTECKI Z., *Analiza wpływu mikroklimatu na emisję wyladowań niezupełnych w maszynach elektrycznych*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 90/2011, s. 35–40.
- [10] STONE G.C., BOULTER E.A., CULBERT I., DHIRANI H., *Electrical insulation for rotating machines*, IEEE PRESS, series on Power Engineering, USA, 2004.
- [11] SZYMANIEC S., *Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń i stanu łożysk silników indukcyjnych klatkowych w warunkach przemysłowej eksploatacji*, Studia i Monografie, z. 193, Wydawnictwo Politechniki Opolskiej, Opole 2006.
- [12] SZYMANIEC S., *Wykorzystanie funkcji korelacji w pomiarach on-line wyladowań niezupełnych silników elektrycznych w przemyśle i energetyce*, Energetyka, 2010, nr 10, s. 675–680.
- [13] YOUNSI K., SNOPEK D., HAYWARD J., MENARD P., PELLERIN J.C., MACLAREN J., *Benefits of partial discharge analysis – Seasonal Changes in Partial Discharge Activity on Hydraulic Generators*, Estudios – Electricos 2E News 2010, No. 7, pp. 7–11.

THE ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF ENVIRONMENTAL CONDITIONS ON THE EMISSION OF PARTIAL DISCHARGES IN ELECTRICAL MACHINES

The article presents the results of research which include an assessment of influence of selected microclimate parameters on the issue of partial discharges 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 flow velocity, humidity and the relative moisture of air. It also measured the parameters of partial discharges like: partial discharge intensity (PDI), the amplitude of discharges (Q_{\max}) and the partial discharge pulses per second (PPS). In summary, the author presents the recommended parameters of the environment, which are beneficial to long-term operation of electrical machines.