

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

Sławomir SZYMANIEC*
Zbigniew PLUTECKI*

PRACA MASZYN ELEKTRYCZNYCH W RÓŻNYCH WARUNKACH MIKROKLIMATYCZNYCH

W artykule przedstawiono wyniki badań zjawisk cieplno-przepływowych, które kształtują się w stanie równowagi między pracującymi maszynami elektrycznymi i zewnętrznymi warunkami środowiska. Badania przeprowadzono w warunkach przemysłowej eksploatacji mierząc: temperaturę powietrza, temperaturę promieniowania, prędkość ruchu powietrza, wilgotność względną powietrza oraz stopień zapylenia. Ponadto przedstawiono wybrane wyniki pomiarów wielkości opisujących wielkość emisji wyładowań niezupełnych, które wykonano metodą *on-line*. Autorzy przedstawiają wyniki badań własnych silnika indukcyjnego pierścieniowego wysokiego napięcia dużej mocy, stanowiącego napęd krytyczny cementowni. Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano wnioski, w których zwrócono uwagę na właściwy sposób kształtowania zewnętrznych warunków pracy maszyn elektrycznych.

1. WSTĘP

Warunki środowiska, w jakich pracują maszyny elektryczne mogą determinować czas ich bezawaryjnej eksploatacji [6, 8, 9]. Wielu autorów wskazuje, że nie przestrzeganie wymagań producentów, w tym zakresie, może prowadzić do przegrzewania się uzwojeń, nie dotrzymania deklarowanych parametrów eksploatacyjnych, obniżenia sprawności, czy w dłuższym okresie czasu do przedwczesnego starzenia się układów izolacyjnych uzwojeń [3, 9, 10].

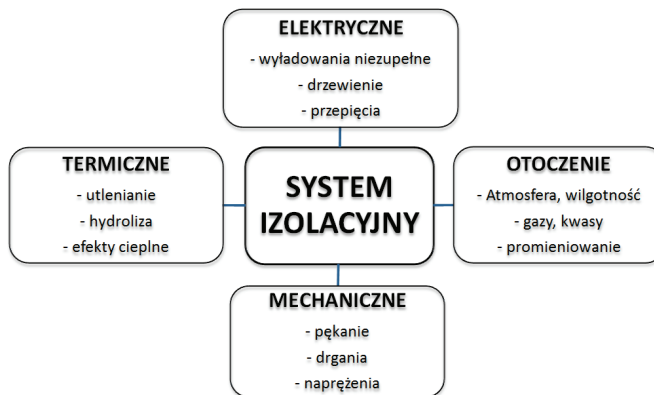
Biorąc pod uwagę powyższe argumenty, maszyny elektryczne powinny pracować w pomieszczeniach, w których świadomie kształtowane są warunki środowiskowe, w sposób uwzględniający aktualny stan pracy tych urządzeń bez względu na zmieniające się zewnętrzne warunki klimatyczne. Niestety doświadczenia autorów wskazują, że w warunkach przemysłowej eksploatacji bywa często inaczej.

* Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i informatyki, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole.

W celu uświadomienia problemu poniżej opisano przykład eksploatacji silnika indukcyjnego pierścieniowego wysokiego napięcia, dużej mocy, stanowiącego jeden z napędów krytycznych cementowni, który jest narażony na oddziaływanie zmiennych warunków środowiskowych i wynikające z tego faktu zagrożenia.

2. PRZYCZYNY STARZENIA SIĘ IZOLACJI UZWOJEŃ

Czas życia izolacji uzwojeń silników i generatorów w warunkach przemysłowej eksploatacji zależy od bardzo wielu czynników. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć naprężenia wywołane zmiennymi warunkami cieplnymi, elektrycznymi, mechanicznymi oraz wywołane wpływem oddziaływania środowiska zewnętrznego (rys. 1) [10]. Każde z tych oddziaływań wpływa indywidualnie na stan izolacji. Występując jednak łącznie tworzą, tzw. oddziaływanie złożone.

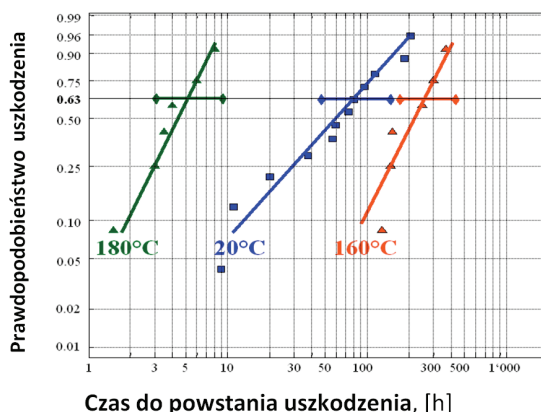


Rys. 1. Czynniki wpływające na starzenie się izolacji wg IEC 60505
Fig. 1. Ageing stresses (according to IEC 60505)

Według dwóch różnych ośrodków badających przyczyny uszkodzeń maszyn elektrycznych IEES i EPRI, udział czynników związanych z oddziaływaniem otoczenia w jakich pracują maszyny szacowany jest odpowiednio na 38,7 i 32% [10]. W tym, wpływ zbyt wysokiej temperatury, za niskiej lub zbyt wysokiej wilgotności względnej powietrza oraz nieprawidłowego przewietrzania izolacji uzwojeń silników wynosi aż 12,7% [10]. Jedną z głównych przyczyn takiego stanu rzeczy jest nie docenianie wpływu tych parametrów.

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 określony w warunkach laboratoryjnych przedstawiono na rysunku 2. Wyniki pokazują, że najlepszą żywotność izolacji dla badanej kompozycji uzyskano w

temperaturze 160°C. Można to tłumaczyć lepszą elastycznością żywicy wiążącej, która redukuje ryzyko powstawania pęknięć, ale również poprzez zmniejszenie wewnętrznych naprężeń pochodzących z reakcji utwardzania. W temperaturze 180 °C następuje przyspieszone starzenie badanych próbek przez co ich żywotność została znacznie zredukowana. Jest to przyczyną termicznej degradacji żywicy wiążącej. Przy zbyt niskiej temperaturze pracy (około 20 °C), również obserwuje się skrócenie czasu bezawaryjnej pracy, lecz pochylenie linii wskazuje na nieco łagodniejszy przebieg tego zjawiska. Według *T. Weiers* optymalną temperaturą pracy dla izolacji epoksydowych na bazie miki, przy której uzyskuje się maksymalny czas życia, to 90 °C [3].



Rys. 2. Trwałość napięciowa izolacji wywołana temperaturą
Fig. 2. Influence of the ageing temperature on voltage endurance

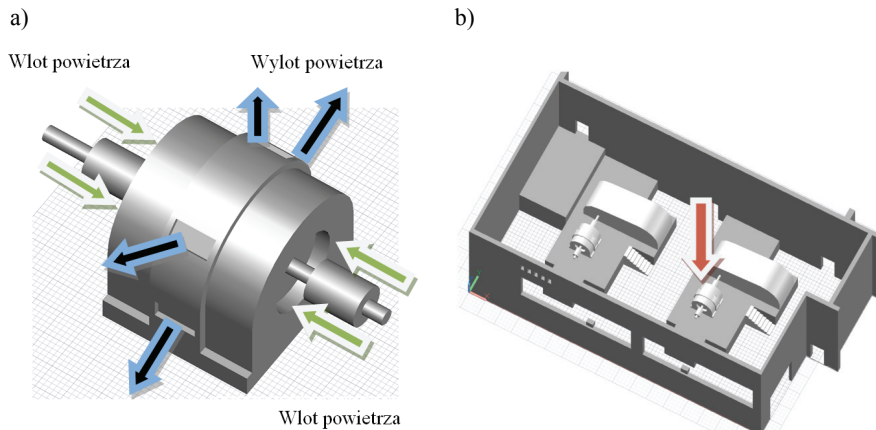
Izolacja wysokiego napięcia maszyn wirujących podczas przemysłowej eksploatacji jest narażona dodatkowo na oddziaływanie drgań mechanicznych. W wyniku stosowania izolacji kompozytowych, które charakteryzują się różnymi współczynnikami rozszerzalności objętościowej, zmiana obciążenia silnika wpływa na powstawanie nowych naprężeń. Cennych informacji w tym zakresie dostarczają prowadzone eksperymenty laboratoryjne [3]. Poddając, np. izolowany pręt miedziany, wibracjom o częstotliwości 100 Hz i amplitudzie $\pm 0,5$ mm oraz jednocześnie obciążeniom elektrycznym $U = 28$ kV, uzyskano dla wybranych kompozycji układów izolacyjnych, wyraźne skrócenie czasu ich życia. Próbie poddano dwa różne materiały izolacyjne: izolacja A wykonana na bazie połączenia szkła, taśmy mikowej i żywicy epoksydowej wykonana w technologii VPI i izolacja B wykonana z połączenia włókniny poliestrowej pokrytej taśmą z miki wykonanej również w technologii VPI. Wyniki pokazują, że żywotność izolacji B została 10-krotnie zredukowana poprzez wpływ drgań, podczas gdy żywotność izolacji poddanej jedynie oddziaływaniom elektrycznym nie wykazuje dużych różnic w stosunku do izolacji A.

3. BADANIA WŁASNE

3.1. CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU BADAŃ

Przedmiotem badań jest otoczenie w jakim pracuje wysokonapięciowy silnik indukcyjny pierścieniowy o mocy 1 MW i jego wpływ na stan izolacji uzwojeń stojana. Napięcie zasilania silnika to 6 kV przy częstotliwości 50Hz, prędkość obrotowa 738 obr/min, prąd wirnika 560 A, stopień ochrony silnika 44IP, klasa izolacji B.

Badany silnik wraz z przekładnią mechaniczną stanowiący zespół napędowy młyna cementu jest zainstalowany w hali maszynowni o wymiarach hali: 22,9×12×9,4 m. o powierzchni 265,5 m² i kubaturze 2480 m³ (rys. 3a). W hali zainstalowany jest jeszcze drugi taki sam zespół. Hala jest wyposażona w system wentylacji grawitacyjnej: nawiew przez nieszczelności oraz okresowo poprzez otwierane drzwi, wywiew przez kratki wywiewne na wysokości +7,5 m o łącznej pow. 0,75 m². Celem wspomagania wentylacji grawitacyjnej w okresie letnim przewidziane są dwa wentylatory nawiewne o wydajności 5500 m³/h każdy. W pomieszczeniu jest brak instalacji grzewczej.



Rys. 3. Obiekt badań: a) hala wraz z lokalizacją badanego silnika, b) schemat przewietrzania silnika
 Fig. 3. Object of research: a) hall along with the location of the test engine, b) motor ventilation scheme

Silnik o budowie otwartej chłodzony jest w układzie osiowo-promieniowym (rys. 3b). Powietrze do przewietrzania jest pobierane bezpośrednio z otoczenia hali poprzez otwory w osłonach bocznych i kierowane częściowo między żebra szkieletu wirnika, skąd przez kanał przechodzi do otworów wylotowych, a częściowo przechodzi przez uzwojenia stojana i przez przestrzeń między żebromi i kadłubem. Z silnika powietrze jest kierowane na zewnątrz bezpośrednio do hali. Powietrze w hali jest zanieczyszczone cząstkami pyłu cementowego.

3.2. INSTALACJA BADAWCZA I SPOSÓB PROWADZENIA BADAŃ

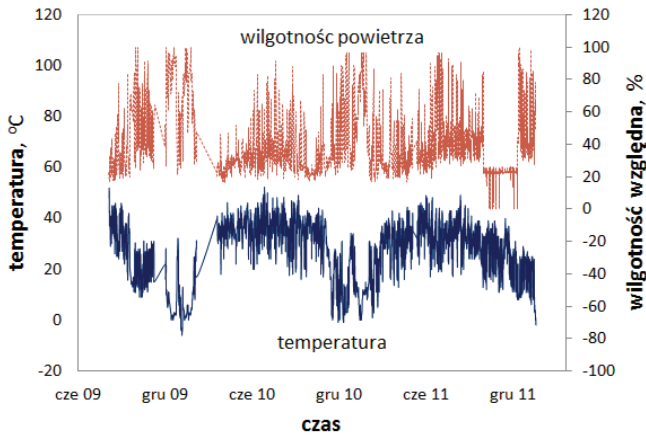
Instalację pomiarową stanowią: system monitorowania wyładowań niezupełnych R-500 firmy *Vibrocenter* do oceny stanu izolacji uzwojeń silnika podczas jego normalnej pracy (metoda *on-line*) [9]; wysokiej klasy stacjonarny analizator *Multilog IMx-S* firmy *SKF* do diagnostyki ciągłej stanu łożysk rozbudowany o zespół czujników do pomiaru temperatur i wilgotności powietrza wokół badanego silnika; mikroprocesorowy miernik mikroklimatu MM-01 do stacjonarnego pomiaru wielkości komfortu cieplnego; przenośny zestaw *Testo 435-2* do pomiaru i oceny pracy systemu wietrzenia silnika; kamera termowizyjna oraz pyłomierz.

Badania wykonano z wykorzystaniem opisanej wyżej instalacji pomiarowej. Pomiary prowadzono w sposób ciągłym z przerwami technologicznymi od 28 sierpnia 2009 r. Początkowo pomiary rejestrowano trzy razy na dobę. Następnie zwiększono częstość pomiarów do 2 godzin a obecnie do 1 godziny. Okresowo dokonywano pomiarów skuteczności przewietrzania silnika przenośną aparaturą pomiarową.

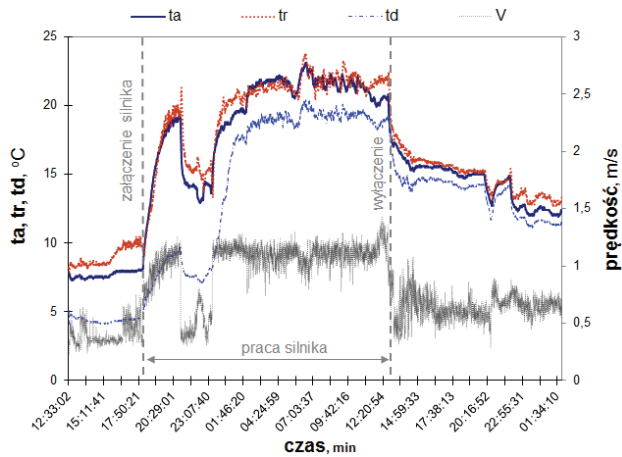
3.3. PRZYKŁADOWE WYNIKI BADAŃ

Badany silnik pracuje w sposób okresowy, co ma bezpośredni wpływ na panujące w pomieszczeniu warunki mikroklimatyczne. Przy braku instalacji grzewczej to zyski ciepła z pracującego silnika i urządzeń pomocniczych są podstawowym źródłem ciepła w hali. Z pomiarów wynika, że wielkości mikroklimatu podczas pracy silnika ulegają ciągłej zmianie (rys. 4). W ciągu roku temperatura powietrza w hali zmienia się w zakresie od -5 do 50 °C a wilgotności od 20 do 100%. W okresie letnim obserwuje się okresowo wzrost temperatury powietrza powyżej 40 °C, czyli powyżej dopuszczalnej temperatury pracy silnika określonej przez producenta. W okresie zimowym z kolei temperatura obniża się poniżej 0 °C. Przebieg zmienności wilgotności względnej powietrza wskazuje na przekraczanie wartości dopuszczalnej 70% zarówno w okresie zimowym, jak i letnim.

Włączenie silnika powoduje szybki wzrost temperatury powietrza w hali powodując wzrost o ponad $10\div 20$ °C w ciągu zaledwie 60 minut (rys. 5). W czasie pracy silnika wzrasta również prędkość powietrza od $0,3$ do ponad $1,5$ m/s, a spada wilgotność względna o blisko 20%. Otwarcie przez obsługę drzwi wywołuje gwałtowny spadek temperatur i prędkości powietrza natomiast wzrost wilgotności względnej. Po zamknięciu drzwi ponownie rosną badane temperatury i prędkość powietrza. Rośnie również wilgotność względna powietrza, co świadczy o intensywnym dopływie powietrza zewnętrznego w wyniku różnicy temperatur. Temperatura punktu rosy jest niższa od temperatury powietrza średnio o $3\div 4$ °C. Różnica ta jednak wyraźnie spada podczas pracy silnika do $1,5\div 2$ °C.

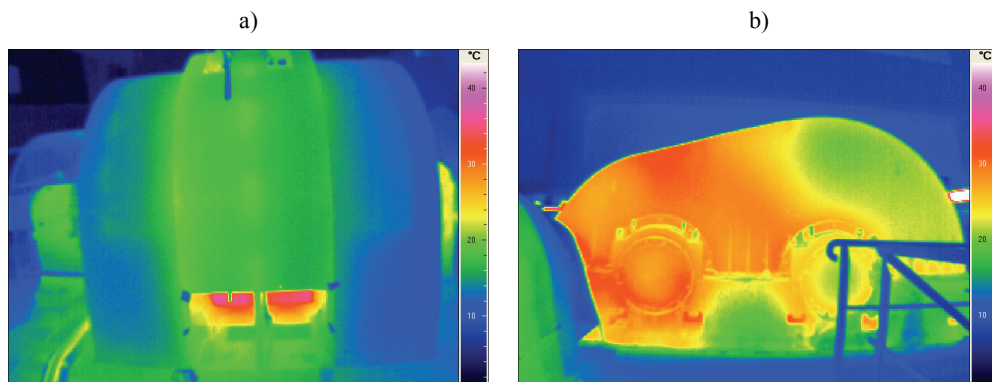


Rys. 4. Histogram zmian temperatury i wilgotności powietrza
 Fig. 4. Histogram of air temperature and humidity

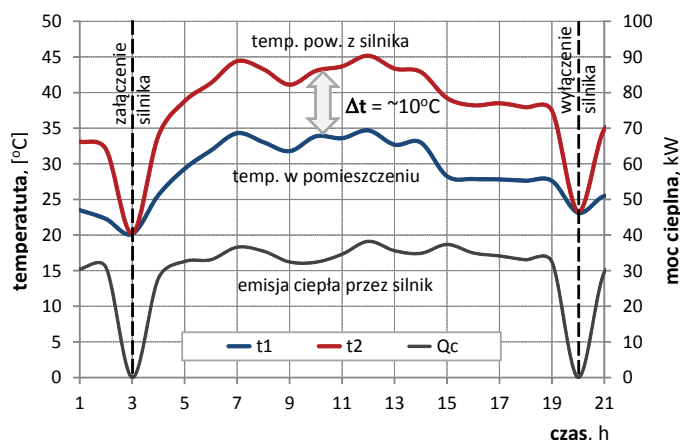


Rys. 5. Warunki pracy silnika: t_a , t_r , t_d – temp. powietrza, promieniowania, punktu rosy, v – prędkość
 Fig. 5. The operating conditions: t_a , t_r , t_d – temperature of air, radiation, dew point, v – velocity

Podczas pomiarów kamerą termowizyjną okazało się, że intensywnym źródłem ciepła oprócz badanego silnika (rys. 6a) jest współpracująca z nim przekładnia mechaniczna. Na jej powierzchni kształtuje się temperatura rzędu $35\div 55\text{ °C}$ w zależności od pory roku (rys. 6b). Wskazane źródła emitują ciepło do pomieszczenia poprzez promieniowanie i konwekcję. Przy obciążeniu silnika rzędu $70\div 100\%$ emisja ciepła na drodze konwekcyjnej wymiany ciepła wynosi $35\div 40\text{ kW}$ (rys. 7). Powoduje to, że przy jednoczesnej pracy dwóch silników wzrost temperatury powietrza w hali nie rzadko przekracza 45 °C . Wzrost temperatury powietrza podczas przepływu przez silnik zmienia się wraz ze zmianą temperatury w pomieszczeniu.



Rys. 6. Rozkład temperatury na powierzchni: a) pracującego silnika, b) przekładni mechanicznej
 Fig. 6. The temperature distribution on the surface: a) cover a running motor, b) mechanical gear case



Rys. 7. Warunki pracy silnika: zmiana temperatury i wilgotności powietrza w pomieszczeniu oraz emisja ciepła z silnika do pomieszczenia

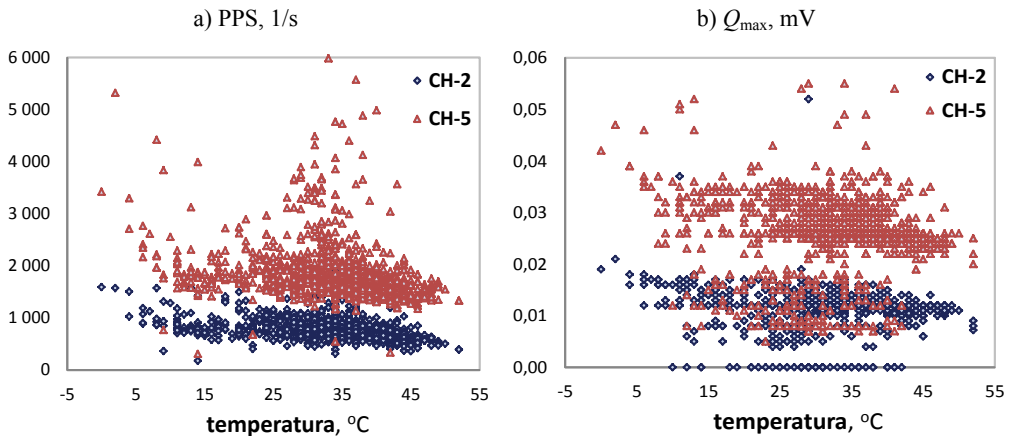
Fig. 7. The operating conditions of the test motor: change in temperature, humidity and emission of heat flow from the motor to spaces

Mechanizm konwekcyjnej wymiany ciepła wywołuje ruch cząstek powietrza w całej hali wywołując cyrkulację przestrzenną. W wyniku tego silnik zasysając powietrze osiowo od strony przekładni i od strony hali nie ma zapewnionej symetrii chłodzenia. Różnica temperatur latem wynosi nawet 10 °C.

Przyczyną niesymetrycznego chłodzenia silników może być również zaburzenie swobodnego przepływu powietrza chłodzącego. W badanym układzie montaż jednej z osłon bezpieczeństwa zbyt blisko wirującej części wału po stronie przeciw napędowej spowodowało ograniczenie dopływu powietrza i w konsekwencji jego zmniejszenie o blisko 20%. W konsekwencji ta część uzwojeń oddaje do otoczenia

o 5 kW mniej ciepła co powoduje lokalny wzrost temperatury uzwojeń na poziomie 20 °C.

Nieźródnoważone chłodzenie uzwojeń silnika prowadzi również do wzrostu lokalnych wyładowań niezupełnych. Wpływ temperatury powietrza na wielkość emisji wyładowań niezupełnych po dwu stronach układu chłodzenia (strona napędowa i przeciw napędowa) dla tej samej fazy A przedstawiono na rysunku 8. Wyraźnie widać, że praca uzwojeń w strefie gorszego chłodzenia sprzyja większej liczbie wyładowań (PPS) oraz zwiększa ich intensywność (PDI).



Rys. 8. Wpływ jakości chłodzenia na emisję wyładowań niezupełnych silnika:

a) ilość impulsów w 1 sekundzie (PPS), b) amplituda wyładowań (Q_m),
gdzie CH-2 i CH-5 to kanały pomiarowe strony N i P

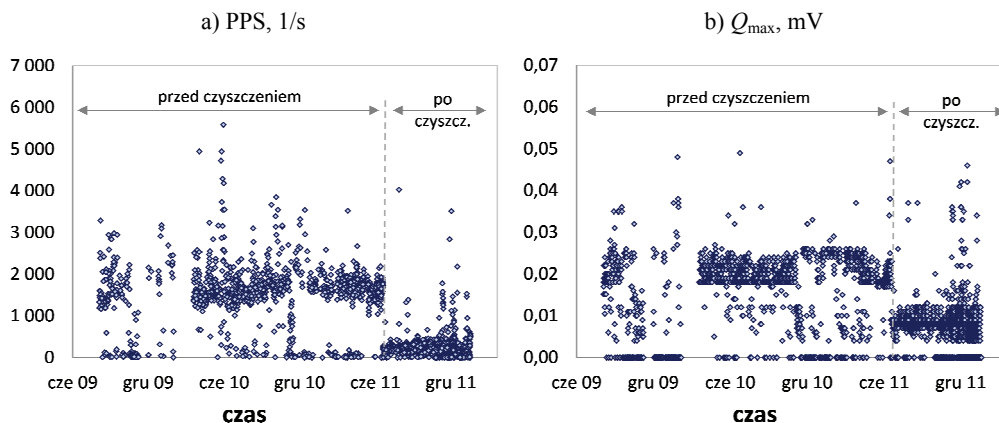
Fig. 8. The influence of quality cooling on PD emission:

a) the number of pulses in 1 second (PPS), b) amplitude of the discharge (Q_m),
where the CH-2 and CH-5 is the measurement channels N and P

Powietrze w hali maszynowni jest zanieczyszczone pyłem cementowym co powoduje kolejną uciążliwość dla eksploatacji silnika. W skład pyłu wchodzi część mineralna stała i lotna (97%) oraz czysty węgiel (do 3%). Rozkład ziarnowy pyłu mieści się w zakresie od 0 do 200 μm . Średnia wilgotność pyłu wynosi 3%.

Podczas pracy badanego silnika w wyniku intensywnej konwekcji pył jest unoszony i rozprzestrzeniany po całym pomieszczeniu. Największe stężenie pyłu w powietrzu występuje zaraz po uruchomieniu silnika. Jest to spowodowane wyrzuceniem pyłu przez otwory wentylacyjne z wnętrza obudowy silnika. Obserwowany wzrost stężenia od 0,35 do 0,9 mg/m^3 następuje w ciągu zaledwie 5 minut. Średnio stężenie pyłu w hali maszyn podczas pracy silnika mieści się między 0,45÷0,6 mg/m^3 a podczas postoju – między 0,25 do 0,4 mg/m^3 .

Pył zawarty w powietrzu zasysany jest wraz z powietrzem wentylacyjnym do wnętrza silnika i podczas normalnej pracy ponownie wyrzucany na zewnątrz. Podczas wyłączenia część pyłu osadza się na uzwojeniach stojana i wirnika powodując powstawanie cienkiej warstwy. Przy wysokiej wilgotności powietrza podczas stygnięcia może to spowodować powstanie trwałej powłoki cementowej. Skutkiem tego jest gorsza wymiana ciepła i wzrost temperatury izolacji uzwojeń podczas kolejnych godzin pracy. W wyniku czyszczenia uzwojeń silnika suchym powietrzem pod ciśnieniem uzyskuje się poprawę wymiany ciepła oraz co ważniejsze wyraźne zmniejszenie wielkości emisji wyładowań niezupełnych (rys. 9).



Rys. 9. Wpływ oczyszczenia silnika z pyłu cementowego na wielkość emisji wnz: a) PPS, b) Q_m
 Fig. 9. Influence the motor cleaning from cement dust on PD emissions: a) PPS, b) Q_m

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Pomieszczenie przemysłowe, w którym pracują maszyny elektryczne stanowi skomplikowany obiekt z punktu widzenia wymiany ciepła i masy. Na przebieg zjawisk cieplno-przepływowych wpływa między innymi: obecność wewnętrznych źródeł ciepła, wilgoci i zanieczyszczeń; ich ruch; temperatura powierzchni i przegród; struktura i właściwości fizyczno-chemiczne przegród budowlanych; współczynniki przewodzenia ciepła i emisyjności ścian; temperatura powietrza wewnątrz i na zewnątrz pomieszczenia; nasłonecznienie i prędkość wiatru; różnica ciśnień i wilgotności powietrza wywołująca zjawisko infiltracji. Nie bez znaczenia są również działania użytkownikó w polegające np. na okresowym przewietrzaniu pomieszczeń.

Poprawna eksploatacja silników elektrycznych w warunkach przemysłowych, w świetle wyżej przedstawionych zagrożeń, wymaga od służb technicznych dużej wiedzy oraz narzędzi, dzięki którym możliwe jest kontrolowanie i świadome kształ-

owanie warunków otoczenia. Istniejące systemy automatycznej regulacji, kontroli i zabezpieczeń silników nie uwzględniają wielu z wyżej wymienionych aspektów. Brak jest na przykład układów oceniających skuteczność pracy systemu chłodzenia, za pomocą których można by było kontrolować, optymalne z punktu widzenia trwałości izolacji, warunki pracy. Oprócz standardowej kontroli temperatury uzwojeń [4, 5], powinno się mierzyć w sposób ciągły emisję wyładowań niezupełnych i na ich podstawie określać najkorzystniejsze warunki pracy [1, 2, 9].

Utrzymywanie wymaganych warunków środowiskowych w pomieszczeniach pracy, jest możliwe jedynie wtedy, gdy dysponujemy odpowiednim systemem grzewczo-wentylacyjnym. System taki powinien zostać zaprojektowany z uwzględnieniem geometrii pomieszczenia, lokalizacji i wzajemnych oddziaływań wszystkich najważniejszych z punktu widzenia wymiany ciepła i masy urządzeń. W tym celu należałoby na przykład stosować nowoczesne metody symulacji zjawisk [7]. System grzewczo-wentylacyjny powinien pracować w sposób ciągły normując temperaturę i wilgotność według zadanego algorytmu.

Artykuł napisano w ramach realizacji projektu badawczego własnego Nr N N510 536639 „Czujniki do pomiarów off-line i on-line wyładowań niezupełnych w silnikach elektrycznych oraz system kalibracji torów pomiarowych”. Projekt finansowany przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

LITERATURA

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] BRUETSCH R., TARI M., FROEHLICH K., WEIERS T., VOGELANG R., *High Voltage Insulation Failure Mechanisms*, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Vancouver, BC, Canada, June 8–11, 2008.
- [4] DĄBROWSKI M., *Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, WNT, Warszawa 1994.
- [5] KAŻMIERKOWSKI M., KALUS M., ZWIERCHANOWSKI R., *Polski Program Efektywnego wykorzystania energii w napędach elektrycznych PEMP*, Krajowa Agencja Poszanowania Energii S.A., Warszawa 2004.
- [6] PLUTECKI Z., *Wieloparametryczna ocena warunków komfortu cieplnego*, PAK, 2011, nr 2.
- [7] 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.
- [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, Wyd. Politech. Opolskiej, Opole 2006.
- [10] VENKATARAMAN B., GODSEY B. i in., *Fundamentals of a Motor Thermal Model and its Applications in Motor Protection*, Protective Relay Engineers, 2005.

THE ELECTRIC MACHINES
WORKING IN DIFFERENT MICROCLIMATIC CONDITIONS

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 authors 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_m) and the partial discharge pulses per second (PPS). The article also provides the model assumptions which describe the heat flow phenomena in industrial hall room with working electrical drives. The results of the simulations have been verified by obtaining satisfactory qualitative and quantitative convergence between the experimentation and simulation. In summary, the author presents the recommended parameters of the environment, which are beneficial to long-term operation of electrical machines.