

Zbigniew Plutecki
Politechnika Opolska, Opole

ANALIZA ZJAWISK CIEPLNO-PRZEPLYWOWYCH KSZTAŁTUJĄCYCH SIĘ W OTOCZENIU PRACUJĄCYCH MASZYN ELEKTRYCZNYCH

THE ANALYSIS OF THE HEAT-FLOW PHENOMENA BETWEEN OPERATING ELECTRICAL MACHINES AND THEIR ENVIRONMENT

Abstract: 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 (Qmax) 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.

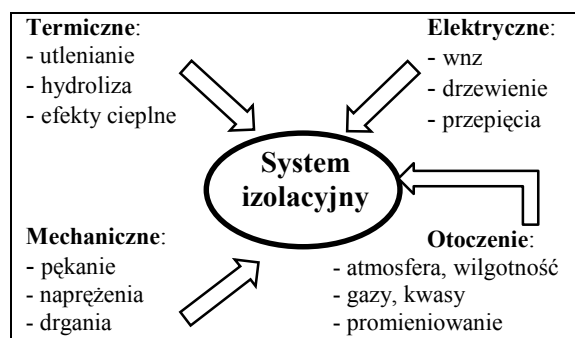
1. Wstęp

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 dotrzymywania 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 autora wskazują, że w warunkach przemysłowej eksploatacji bywa często inaczej. 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.

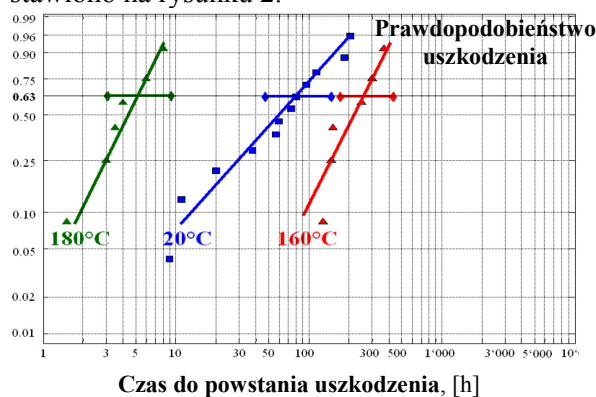


Rys. 1. Czynniki wpływające na starzenie się izolacji wg IEC 60505.

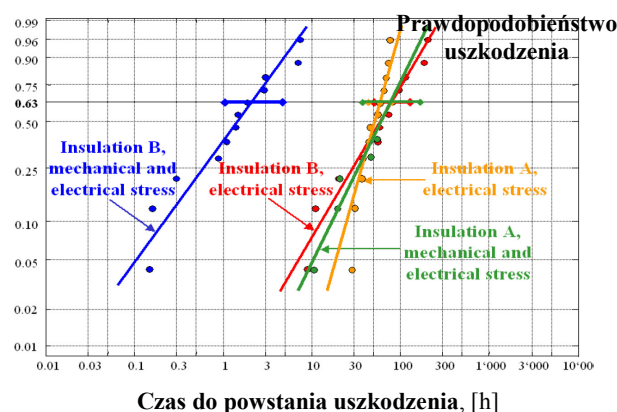
Według dwóch różnych ośrodków badających przyczyny uszkodzeń maszyn elektrycznych IIES i EPRI, udział czynników związanych z oddziaływaniem otoczenia w jakich pracują

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.



Rys. 2. Wpływ temperatury na powstawanie uszkodzeń izolacji [3]



Rys. 3. Wpływ naprężeń mechanicznych wywołanych drganiem na trwałość napięciową izolacji [3]

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].

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 100Hz i amplitudzie $\pm 0,5$ mm oraz jednocześnie obciążeniom elektrycznym $U=28$ kV, uzyskano dla wybranych kompozycji układów izolacyjnych, wyraźne skrócenie czasu ich życia (rys.3). 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 (rys. 3).

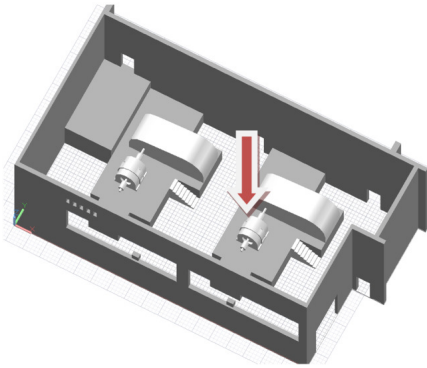
3. Badania własne

3.1. Charakterystyka obiektu badań

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

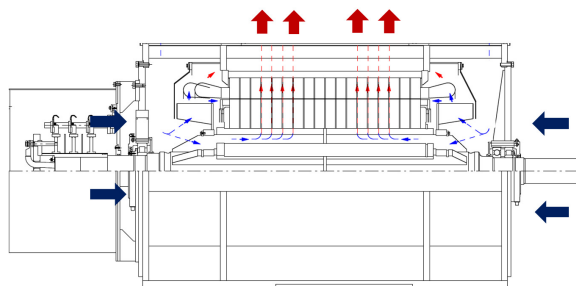
Badany silnik wraz z przekładnią mechaniczną stanowiący zespół napędowy młyna cementu jest zainstalowany w hali maszynowni o wymiarach hali: 22,9x12x9,4m o powierzchni 265,5m² i kubaturze 2480m³ (rys.4). W hali

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 +7,5m o łącznej pow. 0,75m². Celem wspomaganie wentylacji grawitacyjnej w okresie letnim przewidziane są dwa wentylatory nawiewne o wydajności 5500m³/h każdy. W pomieszczeniu jest brak instalacji grzewczej.



Rys.4. Topologia hali przemysłowej wraz z lokalizacją badanego silnika

Silnik o budowie otwartej chłodzony jest w układzie osiowo - promieniowym (rys.5). 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 żebrami i kadłubem. Z silnika powietrze jest kierowane na zewnątrz bezpośrednio do hali. Powietrze w hali jest zanieczyszczone cząstkami pyłu cementowego.



Rys.5. Schemat przewietrzania silnika

3.2. Instalacja badawcza

Instalację pomiarową stanowią: system monitorowania wyładowań niepełnych R-500 firmy *Vibrocenter* do oceny stanu izolacji uzwojeń silnika podczas jego normalnej pracy (metoda *on-line*) [9]; wysokiej klasy stacjo-

narny 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.

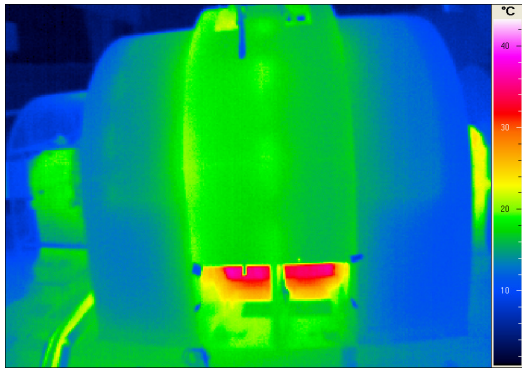
3.3. Sposób prowadzenia badań

Badania wykonano z wykorzystaniem opisanej wyżej instalacji pomiarowej. Pomiaru prowadzono w sposób ciągły z przerwami technologicznymi od 28 sierpnia 2009r. 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. Równolegle do prowadzenia badań pomiarowych w warunkach przemysłowej eksploatacji prowadzono eksperymenty symulacyjne z wykorzystaniem modelowania numerycznego. Opracowano model opisujący zjawiska ciepłno - przepływowe w trójwymiarowej geometrii, której kształt i wymiary wiernie odwzorowują badane pomieszczenie. Badane zjawiska opisano równaniami: ciągłości przepływu, ruchu i transportu energii z wykorzystaniem modelu przepływów turbulentnych. Obliczenia wykonano metodą objętości skończonych w środowisku *Ansys*.

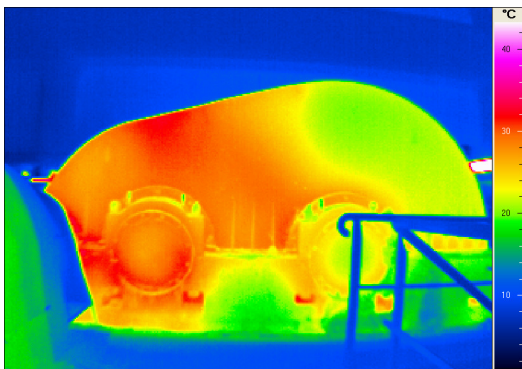
3.4. Przykładowe wyniki badań

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. Podczas pomiarów kamerą termowizyjną okazało się, że intensywnym źródłem ciepła oprócz badanego silnika jest współpracująca z nim przekładania mechaniczna. Na jej powierzchni temperatura kształtuje się na poziomie 35 ÷ 55°C w zależności od pory roku (rys.6 i 7). Wskazane źródła to emisja ciepła do pomieszczenia poprzez promieniowanie i konwekcję. Wpływ pracy silnika na zmianę temperatury w pomieszczeniu przedstawiono na rysunku 8. Wynika z niego, że przy obciążeniu rzędu 70 ÷ 100% emisja ciepła na drodze konwekcyjnej wymiany ciepła wynosi

35÷40kW (rys.9). Powoduje to, że przy jednoczesnej pracy dwóch silników wzrost temperatury powietrza w hali nierzadko przekracza ΔT 45K (rys.8). Wzrost temperatury powietrza podczas przepływu przez silnik zmienia się wraz ze zmianą temperatury w pomieszczeniu. W zakresie temperatur od 0 do 20°C średnio wzrasta o $\Delta T=10K$ (rys.9).

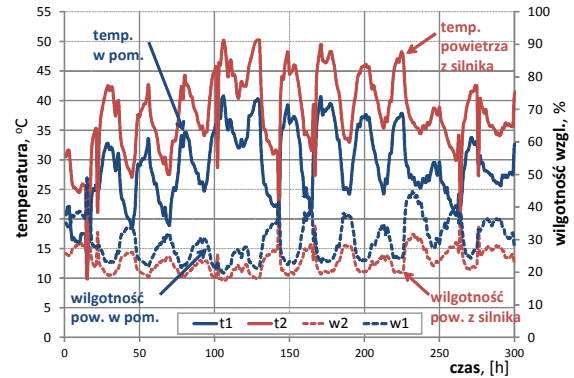


Rys.6. Rozkład temperatury na obudowie pracującego silnika przy średniej temperaturze w pomieszczeniu 10°C

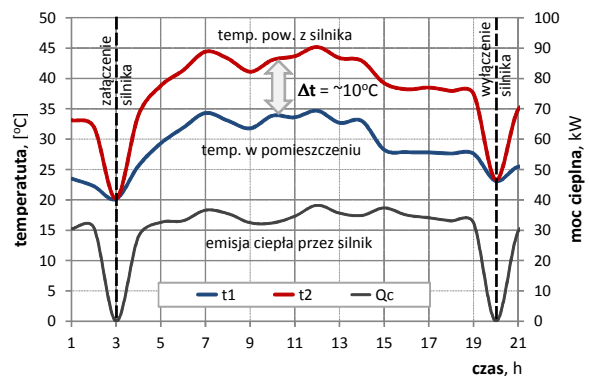


Rys.7. Rozkład temperatury na powierzchni przekładni, warunki pomiaru jak wyżej.

Uzyskane na drodze obliczeń numerycznych wyniki potwierdzają badania pomiarowe, dostarczając jednocześnie szereg dodatkowych informacji (rys.10÷11). Skala kolorów odpowiada temperaturze. Z badań tych wynika ponadto, że praca silników powoduje w pomieszczeniu dużą niejednorodność pola temperatury i prędkości. Przy temperaturze zewnętrznej 0°C nierównomierność sięga 26°C, przy prędkościach rzędu 0,3÷9m/s. Mechanizm konwekcji wywołuje ruch cząstek powietrza w całej hali wywołując cyrkulację przestrzenną. W wyniku tego silnik s1 zasysając powietrze osiowo od strony przekładni p1 i od strony hali nie ma zapewnionej symetrii chłodzenia. Różnica temperatur wynosić może latem nawet 10°C (rys.10).

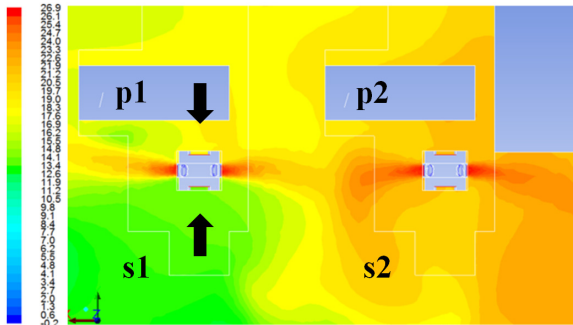


Rys.8. Warunki otoczenia w jakich pracuje badany silnik

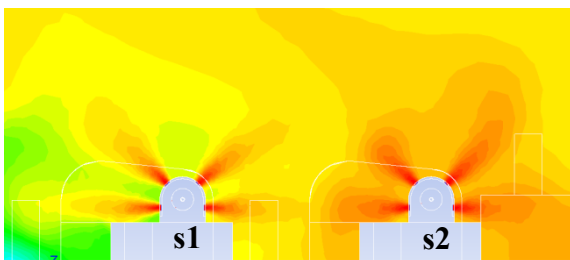


Rys.9. Emisja ciepła przez pracujący silnik

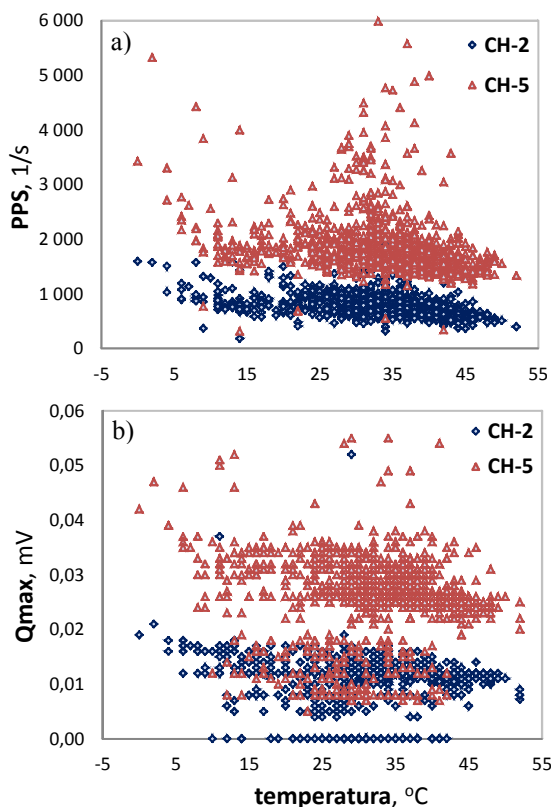
Przyczyną niesymetrycznego chłodzenia silników może być również zaburzenie swobodnego przepływu powietrza chłodzącego. W badanym układzie montaż jednej z osłon bezpieczeństwa zbyt blisko wirującej części wału po stronie przeciwnapędowej spowodowało ograniczenie dopływu powietrza i w konsekwencji jego zmniejszenie o blisko 20%. W konsekwencji ta część uzwojeń oddaje do otoczenia o 5kW mniej ciepła, co powoduje lokalny wzrost temperatury uzwojeń na poziomie $\Delta T=20K$. Niezrównoważone chłodzenie uzwojeń silnika prowadzi również do wzrostu lokalnych wylądowań niezupełnych. Wpływ temperatury powietrza na wielkość emisji wylądowań niezupełnych po dwu stronach układu chłodzenia (strona napędowa i przeciwnapędowa) dla tej samej fazy A przedstawiono na rysunku 12. Wyraźnie widać, że praca uzwojeń w strefie gorszego chłodzenia sprzyja większej liczbie wylądowań (PPS) oraz zwiększa ich intensywność (PDI).



Rys.10. Rozkład temperatury powietrza w płaszczyźnie poziomej hali silników



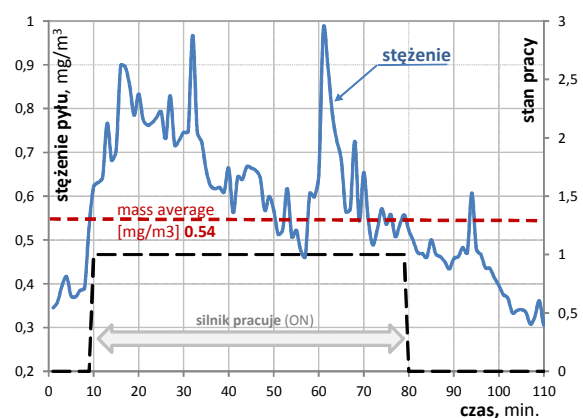
Rys.11. Rozkład temperatury powietrza w płaszczyźnie pionowej hali silników



Rys.12. Wpływ jakości chłodzenia na emisję wyładowań niepełnych: a) ilość impulsów w 1 sekundzie (PPS), b) amplituda wyładowań (Q_{max}); gdzie: CH-2 i CH-5 to odpowiednio strona napędowa i przeciwnapędowa

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 $200\mu\text{m}$. 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 (rys.13). Jest to spowodowane wyrzuceniem pyłu przez otwory wentylacyjne z wnętrza obudowy silnika. Obserwowany wzrost stężenia od $0,35$ do $0,9\text{ mg/m}^3$ następuje w ciągu zaledwie 5 minut. Później wartość stężenia już spada. Okresowo można obserwować chwilowe wzrosty stężenia. Jest to spowodowane pojawieniem się nowego źródła pyłu, np. poprzez otwarcie drzwi z hali młynów cementu. Średnio stężenie pyłu w hali maszyn podczas pracy silnika mieści się między $0,45 \div 0,6\text{ mg/m}^3$, a podczas postoju między $0,25$ do $0,4\text{ mg/m}^3$.

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.



Rys.13. Stężenie pyłu cementowego mierzone w pobliżu badanego silnika podczas jego pracy

4. Podsumowanie i wnioski

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 przejmowania 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 użytkowników 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 kształtowanie 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 niepełnych 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.

5. Literatura

- [1]. Bertenshaw D., Sasic M.: *On-line Partial Discharge Monitoring on MV motors-Casestudies 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.
- [3]. Bruetsch R., Tari M., Froehlich K., Weiers T., Vogelsang 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]. Kaźmierkowski 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 cieplno-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 inni: *Fundamentals of a Motor Thermal Model and its Applications in Motor Protection*. Protective Relay Engineers, 2005.

Autor

Dr. inż. Zbigniew Plutecki
 Politechnika Opolska
 Wydział Elektrotechniki, Automatyki
 i Informatyki. Instytut Elektrowni i Systemów
 Pomiarowych
 45-272 Opole ul. Sosnkowskiego 31
 z.plutecki@po.opole.pl

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.