

ZARZĄDZANIE PRACĄ MASZYN ELEKTRYCZNYCH Z WYKORZYSTANIEM SYSTEMÓW DO MONITOROWANIA WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

Zbigniew PLUTECKI

Streszczenie: W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania pomiaru emisji wyładowań niezupełnych (*wnz*) do monitorowania i diagnostyki stanu technicznego izolacji uzwojeń maszynach elektrycznych wysokiego napięcia w warunkach przemysłowej eksploatacji. Autor, na podstawie własnych badań i doświadczeń, zaproponował koncepcję rozbudowy obecnie stosowanych systemów do monitorowania emisji *wnz* o moduł prognozowania stanu izolacji z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych.

Słowa kluczowe: cykl życia produktu, diagnostyka stanu izolacji, wyładowania niezupełne, systemy eksperckie, sztuczne sieci neuronowe.

1. Wprowadzenie

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. Od inżynierów żąda się, aby naturalny proces starzenia się elementów maszyn przebiegał jak najwolniej i w sposób na tyle kontrolowany, aby nie dopuścić do powstania zatrzymań procesów produkcyjnych wynikających z awarii i uszkodzeń.

W celu sprostania oczekiwaniom, wielu użytkowników stosuje narzędzia do ciągłej obserwacji stanu technicznego swoich maszyn podczas ich normalnej eksploatacji [7, 9, 14, 15, 16]. Systemy te są najczęściej stosowane do monitorowania i diagnozowania stanu łożysk tocznych jako tych elementów, które zużywają się najszybciej [220]. Coraz częściej monitoring stanu technicznego maszyn elektrycznych jest stosowany do oceny stanu izolacji uzwojeń stojanów [7, 10, 13, 16]. 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.

Efektywna organizacja procesów zmierzających do bieżącej oceny stanu technicznego badanych elementów maszyn elektrycznych, podczas ich przemysłowej eksploatacji, jest obecnie podstawowym zadaniem nowoczesnej diagnostyki technicznej [5, 6, 11, 12, 15].

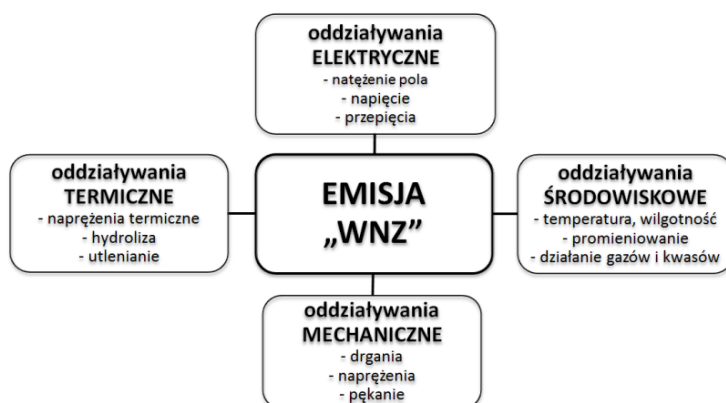
2. Zagadnienie emisji wyładowań niezupełnych w diagnostyce maszyn elektrycznych

Prawidłowa i długotrwała eksploatacja maszyn elektrycznych wymaga znajomości wielu złożonych zagadnień z zakresu zjawisk elektrycznych, termicznych, mechanicznych, termomechanicznych, cieplno-przepływowych, promieniowania czy zjawisk chemicznych [10, 13, 15]. 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 niepełnych (*wnz*), których natura i przebieg może w konsekwencji doprowadzić do trwałego jej uszkodzenia [1, 5, 13, 15].

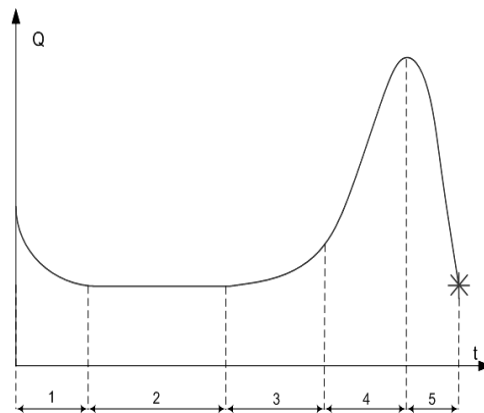
Wielu autorów [1, 2, 4, 8, 11, 12, 13, 15] wskazuje, że pomiar emisji wyładowań niepełnych podczas eksploatacji maszyn dostarcza cennych informacji o jakości technologii wykonania maszyny i o aktualnym stanie układów izolacyjnych jej uzwojeń. Śledzenie zmian *wnz* w długich okresach czasu, dzięki zastosowaniu systemów monitorowania *on-line*, pozwala śledzić proces starzenia układów izolacyjnych i dzięki temu odpowiedzialnie planować przerwy serwisowe, remontowe i modernizacyjne [11, 16].

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 [15]. 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* (rys.1).



Rys. 1. Czynniki wpływające na wielkość emisji wyładowań niepełnych [13]

Gdy izolacja ulega degradacji, częstość i intensywność *wnz* wzrasta (rys.2) [4, 8, 15]. W dużych generatorach i silnikach wysokiego napięcia próby oceny stanu uzwojeń poprzez rejestrację *wnz* są z powodzeniem realizowane już od drugiej połowy ubiegłego wieku [15]. 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 [4, 8, 15, 17]. 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, 13, 15]. Firmy te preferują systemy przeznaczone do pomiaru *wnz* podczas normalnej pracy maszyn elektrycznych (systemy *on-line*).



Rys. 2. Przebieg procesu starzenia się izolacji uzwojeń (ideogram przebiegu „życia” izolacji) [13]

Do niedawna systemy monitorowania *on-line* były trudne do praktycznego zastosowania z uwagi na obecność występujących zakłóceń elektrycznych, np. od pracujących podzespołów elektrycznych, wyładowań koronowych pochodzących od aparatury rozdzielczej czy innych lokalnych źródeł fal radiowych nie pochodzących od uzwojeń izolacji [4, 15].

Wykrywanie wyładowań niepełnych wiąże się z pomiarem wielkości charakteryzujących przebieg emisji *wnz*. Do najważniejszych w nich należy zaliczyć wielkość wyładowań, liczbę impulsów, charakter polaryzacji wyładowań czy położenie wyładowań na przebiegu napięcia pomiędzy fazą a uziemieniem [10, 15]. Każdy z tych parametrów pozwala oceniać inne cechy defektów. Na przykład wielkość wyładowania mówi o wielkości lub objętości wtrącin gazowych, wskaźnik liczby impulsów wskazuje na liczbę pustych przestrzeni lub defektów, znak polaryzacji ładunków wskazuje na położenie inkluzji w izolacji względem miedzi i stali a położenie *wnz* względem wykresu fazowo-rozdzielczego odnosi się do położenia defektów w szczelinie lub w czole uzwojeń [8].

Rejestrowane wyniki pomiarów *wnz* dla danej maszyny można analizować, jeśli zostały wykonane przy podobnych parametrach pracy (obciążenie, temperatura, wilgotność) oraz jeśli zostały wykonane przy użyciu tych samych narzędzi pomiarowych [8]. Możliwe jest również przybliżone porównywanie wyników uzyskanych przy badaniu jednej maszyny z wynikami maszyn podobnych ale tylko wtedy, gdy pomiary wykonano przy użyciu takich samych czujników, przyrządów pomiarowych, przy użyciu tej samej metody kalibracji oraz gdy pomiary wykonywano w zbliżonych warunkach środowiskowych. Z dostępnych analiz statystycznych wynika, że typ maszyny nie ma dużego wpływu na poziom emisji *wnz*. Na wyniki porównań silnie wpływa zmienność obciążenia momentem i temperatura otoczenia pracy [1, 8, 14]. Te czynniki w dużym stopniu zależą od typu i stanu technicznego systemu izolacji. Pozostałe zmienne robocze: napięcie i czynnik chłodzący, muszą być podobne.

3. Wpływ otaczającego środowiska na emisję wyładowań niepełnych

Warunki środowiskowe w jakich pracują maszyny elektryczne mogą determinować czas ich bezawaryjnej eksploatacji [2, 8, 11, 15]. Wielu autorów wskazuje, że nieprzestrzeganie 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 [8, 12, 15].

Według różnych ośrodków badających przyczyny uszkodzeń maszyn elektrycznych, udział czynników związanych z oddziaływaniem otoczenia w jakich pracują maszyny szacowany jest między 32 a 39% [12, 13]. Duży udział tych awarii i uszkodzeń wynika ze zbyt wysokiej lub zbyt niskiej temperatury i wilgotności powietrza oraz z nieprawidłowego przewietrzania izolacji uzwojeń silników. Te przyczyny stanowią aż 12.7% wszystkich uszkodzeń [18,246]. Jedną z głównych przyczyn takiego stanu rzeczy jest nie docenianie wpływu parametrów środowiska na jakość pracujących elementów.

Wpływ temperatury roboczej może silnie wpływać na wyniki mierzonej emisji wnz [8]. Kompozycje materiałowe stosowane do budowy izolacji uzwojeń różnie reagują na zmiany temperatur. Zmiany te mogą być nieznaczne w przypadku niewielkich zmian temperatury pracy rzędu $\pm 5^{\circ}\text{C}$, bądź drastyczne, gdy różnice temperatur sięgają $\pm 20^{\circ}\text{C}$ i więcej.

Duży, choć nie do końca przewidywany, wpływ na emisję wnz ma wilgotność powietrza. Dotyczy to głównie maszyn chłodzonych powietrzem. Wilgotność może obniżyć wytrzymałość powietrza na przebicie elektryczne, a przez to spowodować wzrost emisji wnz na powierzchni izolacji. Dowiedziono w literaturze, że w niektórych sytuacjach wpływ wilgotności powoduje wahania wnz aż o 300% [8]. Ponieważ każdy scenariusz jest inny, jest niezwykle ważne, aby podczas badań rejestrować wilgotność otoczenia, tak, aby można było należycie ocenić trendy i nie podejmować decyzje na podstawie rosnących trendów, które mogą być spowodowane wpływami wilgotności a nie zmianami stanu uzwojenia. Obecne doświadczenie wskazuje, że wilgotność wpływa tylko na aktywność powierzchniową wnz [8].

4. Monitorowanie emisji wnz

Obecnie w eksploatacji znajduje się kilka rozwiązań opartych na pomiarze emisji wnz realizowanych w sposób ciągły podczas pracy maszyn. Systemy te pełnią funkcję diagnostyczną, których głównym celem jest śledzenie rozwoju zmian stanu izolacji uzwojeń. Prowadzony w ten sposób monitoring ułatwia zarządzanie tymi urządzeniami i zmniejsza ryzyko występowania awarii.

Efektywne korzystanie z systemów monitorujących emisję wnz wymaga sporej wiedzy i doświadczenia. Służby techniczne odpowiedzialne za eksploatację maszyn elektrycznych muszą często wspomagać się usługą wysoko wyspecjalizowanych osób i firm zewnętrznych. Najczęściej jest to usługa oferowana bezpośrednio przez producenta danego systemu. W ramach tej usługi oferują pomoc przy ocenie gromadzonych danych pomiarowych oraz biorą udział przy podejmowaniu decyzji związanych koniecznością wyłączenia maszyny i skierowania jej do remontu.

W skład każdego systemu diagnostycznego do monitorowania wyładowań niepełnych, oprócz urządzeń pomiarowych, wchodzi oprogramowanie komputerowe, za pomocą którego można obserwować wyniki pomiarów, zarządzać nimi oraz dokonywać analiz. Poziom zaawansowania dostępnych funkcji analitycznych związany jest z oceną zmian właściwości obserwowanej izolacji. Dokonuje się tego na podstawie przebiegów czasowych badanych wielkości, obserwacji położenia i wielkości impulsów wnz z uwzględnieniem zmian polaryzacji wyładowań na tle przebiegów rozdzielczo – fazowych napięcia probierczego. Oprogramowanie oferuje również możliwość wyznaczania współczynników korelacji wzajemnej między parametrami eksploatacyjnymi silnika a

emisją *wnz*. Dla służb technicznych najważniejszym jednak parametrem kontrolnym jest poziom przyjętych wartości alarmowych. Na obecną chwilę brak jest jasnych kryteriów dla przyjmowania konkretnych wartości alarmowych. Dokonują tego najczęściej przedstawiciele firm sprzedających systemy. Wiedzę czerpią z własnych doświadczeń i wytycznych uzyskanych od projektantów tych urządzeń.

5. Proponowany zakres zmian w monitorowaniu emisji *wnz*

Na podstawie zgromadzonej wiedzy z zakresu funkcjonowania istniejących systemów do monitorowania emisji *wnz* oraz doświadczeń zdobytych podczas realizacji własnych badań, można sugerować rozbudowę obecnych systemów o nowe elementy.

Propozycja autora, w tym względzie dotyczy głównie:

- Rozbudowy infrastruktury pomiarowej. Zdaniem autora powinna ona objąć:
 - czujniki do pomiaru temperatury i wilgotności powietrza w ilości pozwalającej śledzić zmiany mikroklimatu w całym pomieszczeniu pracujących maszyn;
 - czujniki do pomiaru temperatury, wilgotności i prędkości powietrza przewidziane do zabudowy w kanałach wentylacyjnych badanych maszyn w celu wyznaczenia i kontrolowania skuteczności działania układu chłodzenia; w silnikach o budowie otwartej może to być system analogiczny do tego, który został przedstawiony w rozdziale 3; w maszynach o budowie zamkniętej ilość i rodzaj czujników oraz lokalizacja ich zabudowy powinna pozwolić na wyznaczenie bilansu cieplnego maszyny poprzez wyznaczenie strumienia cieplnego czynnika chłodzącego;
 - czujniki do pomiaru temperatury uzwojeń stojana; mogą do tego celu zostać wykorzystane czujniki RTD, które już obecnie są stosowane w układach kontroli i zabezpieczenia maszyn - ich funkcja będzie jednak nieco inna; informacja o rozkładzie temperatury wewnątrz silnika powinna służyć do sterowania pracą układu chłodzenia maszyny w kontekście sterowania komfortem cieplnym w pomieszczeniu;
 - czujniki do pomiaru drgań mechanicznych obudowy stojana; pomiar ten pozwoli śledzić w dłuższym horyzoncie czasowym wpływy wibracji na aktywność *wnz*; kontrola tego parametru pozwoli również oceniać zmienność drgań np. w wyniku oddziaływań urządzeń napędzanych.
Realne zwiększenie liczby czujników pomiarowych w systemie winno wynikać z uwarunkowań techniczno-ekonomicznych określonych dla konkretnego obiektu indywidualnie.
- Rozszerzenia funkcji analitycznych oprogramowania komputerowego o narzędzia do oceny wpływu mikroklimatu na emisję *wnz*. Funkcje te powinny obejmować przede wszystkim:
 - wyznaczanie optymalnych warunków mikroklimatycznych dla komfortowej pracy maszyn elektrycznych z uwzględnieniem postępującego procesu starzenia się izolacji,
 - wyznaczanie krzywych starzenia się izolacji dla uzwojeń każdej z faz oddzielnie, z uwzględnieniem poprawki wynikającej ze zmian mikroklimatu,

- prognozowanie przebiegu procesu starzenia się izolacji w oparciu o gromadzoną bazę danych i uzupełnianą na bieżąco bazę wiedzy oraz poprzez zastosowanie modułu wnioskującego, posiadającego procedury objaśniające.
- Zapewnienia współpracy z innymi systemami diagnostycznymi, w tym z systemami do monitorowania stanu łożysk, celem integrowania środowisk diagnostycznych.
- Zapewnienia współpracy z zewnętrznymi systemami zarządzającymi pracą urządzeń grzewczo-wentylacyjnych na poziomie wymiany informacji o wymaganych warunkach mikroklimatycznych lub opracowanie własnego modułu zarządzania mikroklimatem.
- Opracowania w dłuższej perspektywie czasu dedykowanego systemu eksperckiego, pozwalającego na bieżącą ocenę uzyskiwanych wyników pomiarowych, głównie pod kątem diagnostycznej oceny stanu izolacji uzwojeń badanych maszyn. Idea proponowanego systemu polega na przeniesieniu dostępnej wiedzy, zgromadzonej przez najlepszych ekspertów na świecie z tej dziedziny, do programu komputerowego, wyposażonego w bazę danych, konkretne reguły wnioskowania oraz przystępny język komunikacji z użytkownikiem.

Aplikacja winna zawierać moduły funkcjonalne pozwalające na:

- szerszą niż obecnie interpretację danych pomiarowych;
- dokonywanie prognozy zdarzeń w najbliższej i dłuższej perspektywie czasowej;
- ocenę diagnostyczną w zakresie wykrywania uszkodzeń i utrzymywania zdolności produkcyjnej;
- planowanie rutynowych czynności serwisowych oraz okresowych napraw i remontów;
- monitorowanie procesów w sposób ciągły z dynamicznym doborem częstotliwości dokonywania pomiarów;
- sterowanie urządzeniami pomocniczymi mających wpływ na pracę danej maszyny;
- instruowanie obsługi w zakresie podejmowania czynności i decyzji.

Biorąc pod uwagę ilość zaproponowanych wyżej zmian zmierzających do poprawy funkcjonowania i lepszego wykorzystania obecnych systemów diagnostyki stanu izolacji uzwojeń bazujących na pomiarze emisji *wnz*, poniżej podano sugerowany sposób realizacji niektórych z nich.

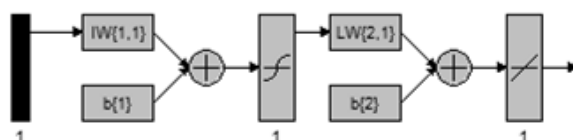
6. Koncepcja modułu prognozowania emisji *wnz* oparta na zastosowaniu sztucznych sieci neuronowych

Za kluczowe uznaje się rozwiązanie problemu prognozowania emisji *wnz*, a tym samym procesu starzenia się izolacji uzwojeń, w wyniku przemysłowej eksploatacji maszyn elektrycznych na podstawie znajomości obecnego stanu technicznego izolacji oraz przebiegu tych zmian jakie obserwowano w okresie minionym. Biorąc pod uwagę ilość zmiennych parametrów zewnętrznych mających wpływ na procesy starzenia się izolacji oraz brak jednoznacznych zależności opisujących te wpływy na proces starzenia, prognozowanie emisji *wnz* można realizować jedynie metodami przybliżonymi

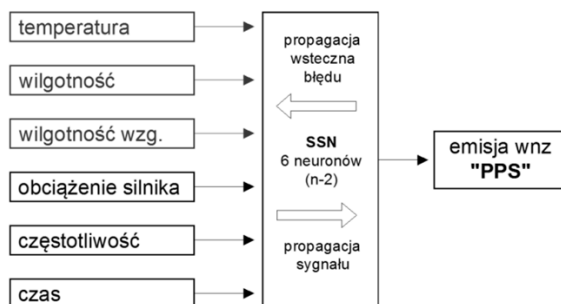
[14,37,40,80]. Dokonując przeglądu metod, które mogą realizować tak określone zadanie oraz wykorzystując własne doświadczenia, proponuje się wykorzystać do tego celu sztuczne sieci neuronowe (SSN).

Istotą działania sieci neuronowej jest przetwarzanie informacji w sposób równoległy. Wykorzystują one cechę uczenia, polegającą w rzeczywistości na długotrwałym dostrajaniu dużej ilości liczb wążących przetwarzane sygnały, zwanych wagami synaptycznymi. Nauczona sieć to układ, który na określone sygnały wejściowe odpowiada we właściwy sposób i może w związku z tym stanowić model pewnego zjawiska lub procesu technologicznego, przewidując np. jego przyszły przebieg. Informacje przechowywane w sieci mają charakter rozproszony, tzn. trudne jest stwierdzenie, który fragment sieci odzwierciedla określoną cechę. Konsekwencją tego jest stosunkowo duża odporność SSN na uszkodzenia [201,232,251].

Dla potrzeb oceny przydatności SSN w prognozowaniu emisji *wnz* przeprowadzono własny eksperyment. Polegał on na sprawdzeniu działania jednokierunkowej struktury SSN składającej się z trzech warstw, tj. warstwy wejściowej, warstwy ukrytej i warstwy wyjściowej. Przyjęty schemat obliczeniowy wraz ze strukturą SSN przedstawiono na rysunkach 3÷4.



Rys. 3. Przyjęty schemat obliczeniowy, struktura SSN – jednokierunkowa, wielowarstwową (warstwa wejściowa, warstwa ukryta oraz warstwa wyjściowa) [13]



Rys. 4. Schemat analizy danych wykorzystany do wyznaczenia prognozowanej wartości wskaźnika PPS przy 6 neuronach warstwy wejściowej [13]

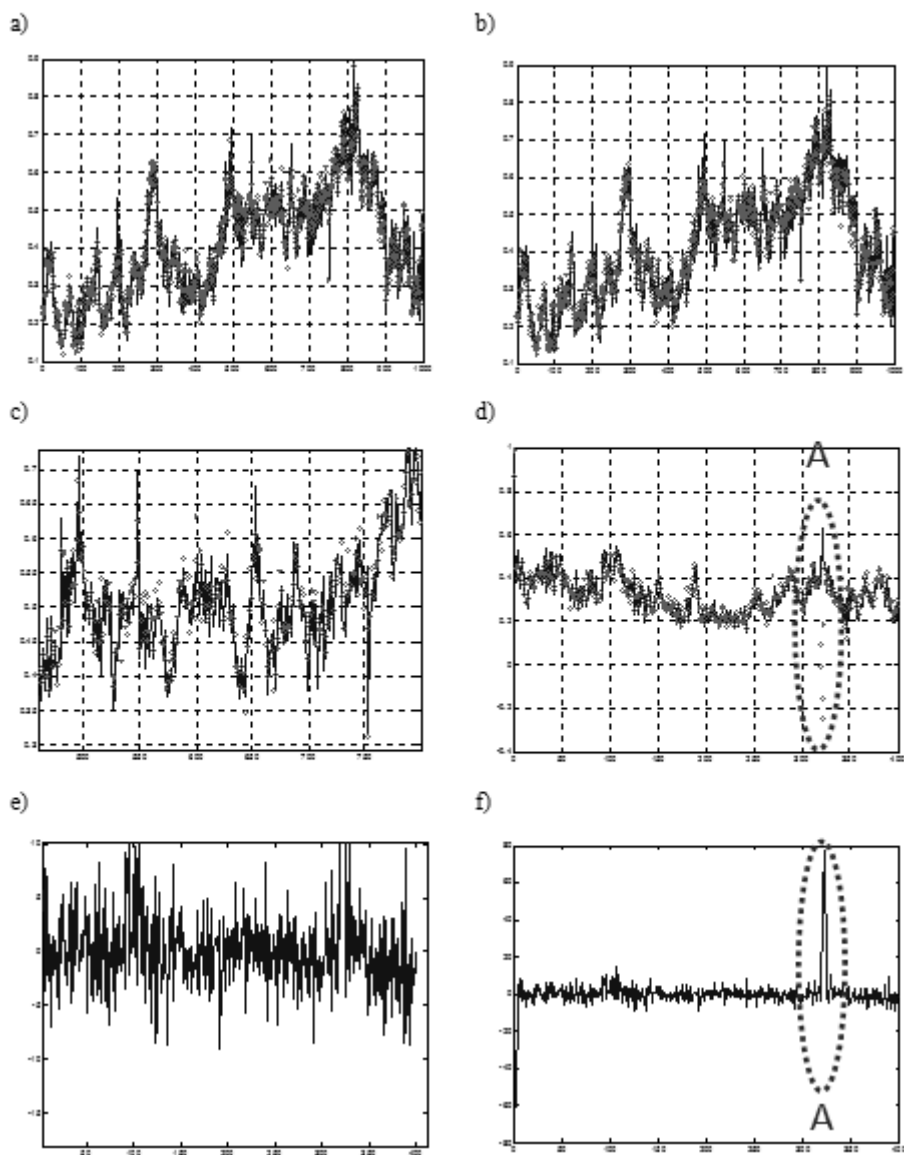
Pierwszy etap eksperymentu polegał na procesie uczenia sieci neuronowej. Wykorzystano do tego celu część zgromadzonych wyników pomiarowych pochodzących z badań emisji *wnz* jednego z silników. Proces uczenia prowadzono w kilku wariantach. Warstwa wejściowa miała od 4 do 6 neuronów w zależności od liczby uwzględnianych wymuszeń. W pierwszej kolejności uwzględniono wyniki pomiarów temperatury i wilgotności względnej powietrza, wilgotności bezwzględnej oraz obciążenia silnika. W kolejnych wersjach obliczeń zwiększano liczbę neuronów wejściowych o kolejny jeden

parametr a mianowicie: czas i częstotliwość napięcia. W warstwie wyjściowej zdefiniowano jeden neuron odpowiadający wskaźnikowi *PPS*. Liczba neuronów w warstwie ukrytej została dobrana w wyniku przeprowadzenia testów wstępnych, gdyż niestety nie ma łatwej metody na dobranie optymalnej liczby neuronów. Zawsze istnieje niebezpieczeństwo, że zastosowana liczba neuronów może prowadzić do zbyt daleko idących uproszczeń, gdy liczba neuronów jest za mała, lub nastąpi uzyskanie efektu „przeuczenia” sieci, gdy neuronów jest zbyt dużo. Ta ostatnia sytuacja może prowadzić do tego, że SSN zostanie wyuczona rozpoznawania specyficznych cech właściwych tylko dla tych konkretnych danych. Ostatecznie do dalszych badań przyjęto sześć neuronów w warstwie ukrytej.

Sam proces uczenia sieci polega na ciągłym dobieraniu współczynników wag tak, aby wartości na wyjściu SSN odpowiadały wartościom wyjściowym z pliku uczącego. Dokonano tego poprzez zastosowanie algorytmu *backpropagation*, czyli wstecznej propagacji wag. Istota tego algorytmu polega na odwrotnym kierunku poprawiania wag – od wag neuronów warstwy wyjściowej do wag neuronów pierwszej warstwy ukrytej. Po zakończeniu procesu uczenia otrzymuje się po jednej macierzy współczynników wag dla pierwszej i drugiej warstwy. W macierzy pierwszej warstwy występuje jeszcze wektor przesunięcia. Jako funkcję aktywacji w obliczeniach wykorzystano funkcję *arctg*. Obliczenia wykonano z wykorzystaniem pakietu *Simulink Matlab*.

Przykładowe wyniki obliczeń uzyskane w procesie uczenia SSN na danych historycznych oraz wynik testu działania SNN na danych niewidzianych przez SNN przedstawiono na rysunku 5. Linia niebieską oznaczono wyniki pomiarów a zielonymi kropkami wartości uzyskane na drodze obliczeń SSN. Dla porównania przedstawiono dwa warianty obliczeń, wykonane przy 5 i 6 parametrach wejściowych. Wielkością uwzględnioną jako szóstą to częstotliwość napięcia. W celu oceny jakościowej działania SSN podano dla nich wykresy uśrednionego błędu kwadratowego, który wyznaczono jako wartość średnią z kwadratów różnic pomiędzy wartością wygenerowaną przez SSN a rzeczywistą pochodzącą z pomiarów.

Uzyskane wyniki w obu wariantach są nad wyraz zadowalające. W pierwszym przypadku średni błąd kwadratowy wynosił przeciętnie +/-5%, w drugim +/-3%. Wartości obliczone w pierwszym wariantcie są nieco gorsze. Ilość zielonych punktów niepokrywających się z przebiegiem wartości zmierzonych jest większy. Uwzględnienie na wejściu SSN dodatkowego parametru, mimo bardzo niewielkich zmian częstotliwości, pozwoliło znacznie poprawić efekt prognozowania. Poprawa jakości prognozowania wskaźnika *PPS* nie jest jednak w stanie zagwarantować poprawności działania w sytuacjach ponadstandardowych. Zakreślony na rysunku 5d obszar oznaczony literą A dowodzi o istnieniu innych przyczyn wyładowań niepełnych aniżeli te, które wykorzystano w procesie uczenia. W świetle już wcześniej przedstawianych analiz, bardzo jest prawdopodobne, że przyczyną wystąpienia różnic jest brak pomiaru któregoś z parametrów drgań mechanicznych.



Rys. 5. Ocena działania SSN: a) i b) wyniki procesu uczenia SSN na danych historycznych przy 5 i 6 parametrach wejściowych, c) i d) wynik testu działania SSN na danych niewidzianych przez SSN dla obu przypadków, e) i f) wykres błędów

7. Wskazówki do projektowania systemów grzewczo-wentylacyjnych pomieszczeń pracy maszyn elektrycznych

W świetle prezentowanych wyników badań oraz szczegółowej analizy zjawisk towarzyszących pracy maszyn elektrycznych bardzo ważne jest zwrócenie szczególnej

uwagi na sposób w jaki powinny być kształtowane warunki mikroklimatyczne w pomieszczeniu pracy maszyn elektrycznych. W praktyce eksploatacyjnej nagminnie jest lekceważenie tych zagadnień. Często wynika to z braku konkretnych wytycznych. W innych przypadkach jest to wynikiem braku należytej infrastruktury technicznej lub odpowiednich narzędzi programowych do realizacji funkcji regulacyjnych. Często bywa również tak, iż urządzenia grzewczo-wentylacyjne zostały zaprojektowane i wybudowane w oparciu o zupełnie inne założenia funkcjonalno-użytkowe pomieszczenia.

Projektując system grzewczo-wentylacyjny w pomieszczeniu przewidzianym do pracy maszyn elektrycznych projektant powinien postępować zgodnie z następującą procedurą:

- Etap 1 – faza koncepcyjna, obejmująca:
 - a) określenie najważniejszych celów, w tym uzyskanie wytycznych od producenta urządzeń niezbędnych do określenia wielkości generowanych zysków cieplnych w różnych warunkach obciążeniowych maszyny oraz wymaganych warunków *komfortu cieplnego maszyny elektrycznej*;
 - b) określenie uwarunkowań wynikających z lokalizacji pomieszczenia;
 - c) określenie uwarunkowań wynikających z możliwości pozyskania źródeł zasilania w ciepło, chłód, energię elektryczną, gaz lub olej opałowy;
 - d) analiza możliwych do zastosowania rozwiązań technicznych uwzględniających powyższe uwarunkowania;
 - e) wariantowa propozycja rozwiązań technicznych i organizacyjnych;
 - f) analiza techniczno-ekonomiczna mająca na celu wskazanie wariantu realizacyjnego; wyboru wariantu należy dokonać w oparciu o wyznaczone wskaźniki oceny efektywności inwestycji z uwzględnieniem wymagań Prawa Budowlanego, Warunków Technicznych oraz innych przepisów formalno-prawnych.
- Etap 2 – faza projektowa:
 - a) opracowanie projektu budowlanego;
 - b) opracowanie projektu wykonawczego;
 - c) uzyskanie niezbędnych uzgodnień i pozwoleń.
- Etap 3 – faza realizacyjna:
 - a) techniczna realizacja projektu;
 - b) rozruch próbny i gwarancyjny;
 - c) szkolenie personelu i przekazanie inwestycji.
- Etap 4 – faza wstępnej eksploatacji:
 - a) pomiary warunków komfortu cieplnego w różnych warunkach eksploatacyjnych;
 - b) weryfikacja nastaw i blokad;
 - c) okresowa kontrola pracy urządzeń wraz z oceną ich skuteczności działania.

Przedstawiony scenariusz postępowania narzuca na zespół projektowy zachowanie wysokiego poziomu wiedzy technicznej i organizacyjnej. Przez wysoki poziom wiedzy technicznej, oprócz klasycznego rozumienia, należy również uznać umiejętność posługiwania się narzędziami do komputerowego wspomaganie procesu projektowego. Chodzi tu głównie o narzędzia z zakresu modelowania zjawisk cieplno-przepływowych, dzięki którym można wirtualnie analizować pracę projektowanego systemu i eliminować na etapie projektu rozwiązania wadliwych. Przykładem takiego narzędzia jest program ANSYS, który przestaje być programem przeznaczonym jedynie do zastosowań badawczych a staje się programem użytkowym dedykowanych dla inżynierów projektantów [12, 13].

Utrzymywanie zalecanych warunków mikroklimatycznych w pomieszczeniach pracy maszyn elektrycznych wymaga stosowania efektywnych układów automatycznej regulacji mikroklimatu. Układy te mogą być realizowane przy wykorzystaniu sterowników swobodnie programowalnych klasy PCL wyposażonych w funkcje regulacji nadążnej. Rozwój systemów do monitorowania emisji *wnz* może w przyszłości pozwolić na korzystanie z wyników analizy wpływu mikroklimatu na wielkość wyładowań, a to pozwoli na aktualizowanie nastaw regulacyjnych urządzeń grzewczo-wentylacyjnych w sposób automatyczny.

8. Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono wskazówki zmian jakie należy zrealizować, zdaniem autora, w obecnych systemach monitorowania emisji *wnz*. W świetle wyników badań oraz przeprowadzonych analiz, zmiany te powinny dotyczyć przede wszystkim: rozbudowy funkcjonalnej oprogramowania służącego do prowadzenia analiz, rozbudowy układu pomiarowego o elementy pozwalające realizować szerszy zakres obserwacji, zapewnienia współpracy systemu z innymi systemami diagnostycznymi obejmującymi kontrolę tej samej maszyny elektrycznej. Ponadto zaproponowano rozbudowę o moduł umożliwiający współpracę z systemami odpowiedzialnymi za kształtowanie warunków komfortu cieplnego w pomieszczeniach pracy maszyn. W dłuższej perspektywie uznaje się za celowe opracowanie dedykowanego systemu eksperckiego, który umożliwi służbom technicznym lepiej pełnić nadzór na prawidłową eksploatacją maszyn. W rozdziale tym przedstawiono również autorską koncepcję modułu przeznaczonego do prognozowania procesu starzenia się izolacji uzwojeń. Zaproponowano wykorzystanie do tego celu sztucznych sieci neuronowych. Uzasadniono ten wybór przykładem, który pozwolił skutecznie prognozować wskaźnik PPS na podstawie zmieniających się parametrów wymuszających. W przykładzie tym udowodniono również zasadność rozbudowy układu pomiarowego o ciągły pomiar obciążenia i częstotliwości napięcia.

Literatura

1. Adwel: PD monitoring, Nota Aplikacyjna 2003.
2. Basztura Cz.: Komputerowe systemy diagnostyki akustycznej. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1996.
3. Batko W.: Metody syntezy diagnoz predykcyjnych w diagnostyce technicznej. ZN, AGH, seria Mechanika, nr 4, 1984, Kraków.
4. Bertenshaw D., Sasic M.: On-line Partial Discharge Monitoring on MV motors- Casestudies on Improved Sensitivity Couplers. Nota Aplikacyjna firmy ADWEL International Canada, 2002.
5. Biernacki A., Zielonka A.: Metody diagnozowania stanu izolacji silników elektrycznych wysokiego napięcia” Wiadomości Elektrotechniczne 1996, nr 12.
6. Brüel & Kjær: Systematic Machine Condition Monitoring. Application notes BO 0299-11.
7. Doble engineering Company: Application for PD Monitoring on Generators, 76th Annual International Doble Client Conference, 2009.
8. 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.

9. Lemke E., Strehl T.: On-line und *Off-line* Diagnose rotierender Hochspannungsmaschinen. Lemke Diagnostics GmbH Volkersdorf Deutschland.
10. Littelfuse: Motor Protection for Medium Voltage Application (above 600Volts), Technical Application Guide, 2010 Littelfuse POWR-GARD Products, www.littelfuse.com.
11. Plutecki Z., Szymaniec S.: Pomiary i monitoring stanu izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych w przemyśle - doświadczenia własne. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne Nr 89 (1/2011), 2011, str. 33-38.
12. Plutecki Z., Szymaniec S.: Pomiary i monitoring stanu izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych w przemyśle – doświadczenia własne. Przegląd Elektrotechniczny, vol 2012, Nr 4a, str.56-59.
13. Plutecki Z.: Analiza wpływu mikroklimatu na emisję wyładowań niezupełnych maszyn elektrycznych w warunkach przemysłowej eksploatacji. Monografia habilitacyjna, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2012r.
14. Sumereder C., Muhr M., Grobalber M., Ahrer A., Balber H., Korbler B.: Observation of Dielectric Parameters at generator Stator Windings Under Changing Environmental Condition, Proceeding of 16th International Symposium on High Voltage engineering, Innes House, Johannesburg SAIEE 2009.
15. 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.
16. Szymaniec S.: Pomiary *on-line* stanu izolacji uzwojeń silników wysokonapięciowych indukcyjnych klatkowych, Wyd. BOBRME, Katowice 2008, Maszyny Elektryczne, nr 79, 2008, str. 91-96.
17. Tommasini D.: Dielectric Insulation & High Voltage Issues, CERN, Bruges 16-25 June 2009.

Dr inż. Zbigniew PLUTECKI
Instytut Elektrotechniki Przemysłowej i Diagnostyki
Politechnika Opolska
45-758 Opole, ul. Prószkowska 76
tel. (77) 439 80 24
e-mail: z.plutecki@po.opole.pl