

prof. dr hab. inż. Sławomir Szymaniec, Katedra Elektrowni, Diagnostyki i Inżynierii Komputerowej,  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Politechnika Opolska

# Uszkodzenia i diagnostyka off-line stanu izolacji uzwojeń w silnikach wysokonapięciowych indukcyjnych klatkowych dla potrzeb energetyki i przemysłu

W artykule przedstawiono wyniki badań własnych autora w zakresie ustalenia przyczyn uszkodzenia się izolacji uzwojeń silników wysokonapięciowych indukcyjnych klatkowych. Przedstawiono rodzaje uszkodzeń izolacji uzwojeń. Omówiono metody diagnostyki off-line izolacji uzwojeń silników, zaprezentowano wyniki badań własnych w zakresie diagnostyki off-line.

Słowa kluczowe: silnik wysokonapięciowy indukcyjny klatkowy, uszkodzenie izolacji uzwojeń, diagnostyka izolacji off-line.

Silniki elektryczne są jednymi z najczęściej stosowanych maszyn napędzających ze względu na łatwość ich zasilania, łatwość sterowania oraz stosunkowo dużą niezawodność. Wśród nich najbardziej dogodnie w eksploatacji są silniki indukcyjne, szczególnie z wirnikiem klatkowym.

Silniki indukcyjne klatkowe stanowią ok. 90% ogólnej ilości silników na świecie pracujących w przemyśle i energetyce. Również łączna moc tych silników stanowi w różnych krajach ok. 90% ogólnej mocy silników elektrycznych zainstalowanych w przemyśle i energetyce. Świadczy to o tym, jak duże znaczenie ma zagadnienie wykrywa-

nia uszkodzeń i diagnozowania silników indukcyjnych klatkowych. W kraju w napędach przemysłowych dużej mocy są stosowane głównie silniki indukcyjne klatkowe wysokiego napięcia (WN) o mocach od 160 kW do 11 MW. Prawidłowa eksploatacja i diagnostyka tych silników jest jednym z najważniejszych zadań dla służb technicznych. Awaryjność silników elektrycznych w energetyce i przemyśle w ostatnich latach wyraźnie spada. Wynika to przede wszystkim z: prowadzenia na coraz wyższym poziomie eksploatacji, obsługi i diagnostyki silników W latach 50-60. ub. stulecia w statystykach przyczyn uszkodzeń maszyn elektrycznych, w tym silników asynchronicznych klatkowych, uszkodzenia izolacji stanowiły nawet 85% wszystkich uszkodzeń. W miarę upływu czasu, przy intensywnym rozwoju materia-

łoznawstwa elektrotechnicznego oraz konstrukcji maszyn elektrycznych, statystyka przyczyn uszkodzeń zmieniła się. W latach 70-80. uszkodzenia izolacji w dalszym ciągu dominowały, ale liczbowo zbliżano się do 50%. Uważa się, że zmiana jakościowa izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych nastąpiła, kiedy firma Westinghouse wprowadziła jako środek wiążący w miejsce lepiszczy naturalnych żywice termoutwardzalne. Jednocześnie w miejsce stosowanych powszechnie materiałów nośnych takich jak papier i tkaniny z włókien naturalnych wprowadzono tkaniny z włókna szklanego. Kolejnym przełomem było wprowadzenie do produkcji materiałów elektroizolacyjnych; żywicy syntetycznych epoksydowo-poliestrowych [19]. W latach 90. uszkodzenia izolacji stanowiły poniżej 50% wszystkich uszkodzeń. Statystyki

światowe z 2004 r. podają, że stojan był w 37% przyczyną uszkodzeń maszyn elektrycznych [19] - tab. 1.

Wnioski autora z wieloletnich obserwacji przyczyn awarii silników elektrycznych w energetyce i w przemyśle krajowym są podobne do wyników przedstawionych w tab. 1. Najczęstszymi przyczynami awarii i nieplanowanych postojów silników w napędach są: uszkodzenia łożysk tocznych i uszkodzenia izolacji uzwojeń silników.

### ■ Izolacja uzwojeń silników

Dobre wykonanie układu elektroizolacyjnego w maszynach elektrycznych jest jednym z trudniejszych zadań konstrukcyjnych i technologicznych [3, 19, 21]. Izolacja uzwojeń silników WN powinna zapewnić okres użytkowania silników w przewidzianych dla niej warunkach eksploatacji przez okres nie krótszy niż 15÷20 lat. Autorowi znane są przypadki, gdy silniki WN były i są nadal eksploatowane 30÷40 lat bez ich przewijania.

W układzie elektroizolacyjnym można wyodrębnić izolację główną i zwojową [3]. Elektrycy zajmujący się pomiarami, remontami i diagnostyką silników elektrycznych wyróżniają: izolację zwojową (nazywaną niekiedy elementarną), izolację międzyfazową i izolację główną. Podział ten wynika między innymi z możliwości pomiarowych. Ze względu na dielektryczne warunki pracy, w układzie elektroizolacyjnym można wyodrębnić trzy strefy: żłobkową, przejściową (po wyjściu boków cewek ze żłobków) oraz czołową (czoła uzwojeń) [3].

Napięcie zasilania maszyny elektrycznej określa wymagania dielektryczne wobec izolacji, kolejnym z wymagań technicznych jest przewidywany przyrost temperatury uzwojeń. Głównie one wpływają na dobór klasy izolacji [3, 7, 19, 21]. Dla zapewnienia większej trwałości maszyny elektrycznej dość często stosuje się materiały elektroizolacyjne zapewniające wyższą klasę izolacji niż to wynika z przewidywanych przyrostów

**Tab. 1. Statystyka uszkodzeń maszyn elektrycznych [19]**

Przyczyna awarii	Procentowy udział
Łożyska	41%
Stojan	37%
Wirnik	10%
Osprzęt, wyposażenie dodatkowe i inne	12%

temperatury [19].

Obecnie w kraju podobnie, jak i na świecie dominują dwie podstawowe technologie wykonywania izolacji w produkcji nowych silników WN i w ich remontach [15, 19, 20, 21]:

- izolacja termoutwardzalna, izolacja prasowana z zastosowaniem termoutwardzalnych taśm mikowych z dużą zawartością lepiszcza. W literaturze nazywana Resin-Rich - RR [19, 20, 21],
- izolacja wykonywana technologią próżniowo-ciśnieniową VPI (Vacuum Pressure Impregnation), izolacja z zastosowaniem porowatych taśm mikowych o małej zawartości lepiszcza [15, 19, 20, 21].

W opinii autora podobnie jak i innych [2, 15, 19, 21] z upływem czasu w izolacji silników elektrycznych technologia VPI staje się technologią wiodącą.

### ■ Narażenia izolacji uzwojeń silników

Przyczyny uszkodzeń izolacji silników są przedstawione w literaturze [1÷25]. Przyczyny te można zestawić w grupy w sposób następujący:

1. narażenia elektryczne,
2. narażenia termiczne,
3. narażenia mechaniczne,
4. narażenia termomechaniczne,
5. narażenia klimatyczne,
6. narażenia chemiczne,
7. narażenia wywołane promieniowaniem.

Wysokonapięciowe uzwojenie stojana musi spełniać szereg kryteriów jakościowych, aby pracować niezawodnie przez wiele lat [19, 21]. Optymalnie zaprojektowany oraz niezawodny układ izolacyjny musi być odporny na działanie bardzo silnego pola elektrycznego, podwyższonej temperatury, narażeń mecha-

nicznych, termomechanicznych i czynników zewnętrznych.

Pełne zestawienie wymagań stawianych materiałom elektroizolacyjnym można znaleźć w literaturze [19, 21]. Idealnego materiału izolacyjnego, który spełniałby wszystkie wymagania nie ma, technolodzy kojarzą różne komponenty, aby uzyskać rozwiązania najlepsze [19, 21].

Analiza narażeń układu izolacyjnego w silnikach upoważnia do wniosków, że konstruktor - projektant silników musi zaprojektować uzwojenie i elementy jego usztywnienia po wcześniejszej wnikliwej analizie sił elektrodynamicznych działających na uzwojenia w szczególności w strefie czoł [3, 4]. Bardzo ważnym etapem projektowania jest dobranie kształtu czoł cewek. Szczegółowe zalecenia odnośnie projektowania uzwojenia stojanów silników, w tym jego części czołowej, można znaleźć w literaturze [3, 4].

### ■ Ocena własna przyczyn uszkodzeń izolacji uzwojeń stojanów

Autor prowadzi od wielu lat obserwacje uszkodzeń uzwojeń w silnikach elektrycznych. Obserwacje te pozwalają uszeregować przyczyny poważnych awarii silników spowodowane uszkodzeniem izolacji uzwojeń stojanów. Należy tu wymienić:

- zwarcia zwojowe na czołach uzwojeń, szczególnie w obrębie główek (rys. 1),
- deformacja czoł cewek obejmująca przede wszystkim skrajne cewki w poszczególnych grupach fazowych uzwojenia stojana (rys. 2), towarzyszy temu rozerwanie wiązań,
- uszkodzenie izolacji przy wyjściu cewki ze żłobka połączone często ze zwarciami do pakietu,

- uszkodzenie izolacji w strefie wykorbienia przy przejściu z prostoliniowego odcinka w główny tük stożkowy,
- zwarcia między połączeniami międzygrupowymi i międzycewkowymi,
- upalenie przewodów zasilających bezpośrednio na odcinku za tablicą zaciskową na łączeniu ze skrajnymi cewkami grup fazowych lub w okolicach izolatorów przepustowych,
- zwarcie zwojowe w cewce w środkowej części rdzenia lub w części skrajnej rdzenia, połączone ze zwarcie do rdzenia stojana,
- poluzowanie mocowania czoł cewek do pierścieni usztywniających co skutkuje wytarciem izolacji, a następnie zwarcie uzwojenia do pierścienia i korpusu.

Autor podobnie jak [4] stwierdza, że w przypadku awarii silnika typu zwarcie zwojowe lub zwarcie do rdzenia stojana prawie zawsze występuje deformacja czoł uzwojenia. Największym deformacjom ulegają skrajne cewki w grupach fazowych, towarzyszy temu uszkodzenie wiązań usztywniających.

Zapobieganie zbyt częstym ewentualnym uszkodzeniom uzwojeń stojanów w silnikach elektrycznych w trakcie eksploatacji sprowadza się w opinii autora do:

1. właściwej eksploatacji silników ograniczającej wielkość sił elektrodynamicznych działających na uzwojenia w szczególności w czasie rozruchów,
2. okresy remontowe i przeglądowne, powinny obejmować przegląd uzwojenia i usunięcie ewentualnych zauważonych anomalii, czy nawet uszkodzeń części żłobkowej i czołowej uzwojeń. Najprostsze jest poprawienie usztywnienia. Możliwe są lokalne naprawy izolacji.

### ■ Metody diagnostyki stanu izolacji uzwojeń silników

W ocenie autora badania izolacji uzwojeń silników elektrycznych są bada-



Rys. 1. Zwarcia zwojowe w obrębie główek, uszkodzenia dla różnych silników



Rys. 2. Deformacja czoł cewek, zwarcia zwojowe, rozerwanie wiązań

niami najważniejszymi - podstawowymi. Wyniki tych badań decydują o dopuszczeniu silnika do eksploatacji, warunkują jego bezpieczną eksploatację, a wcześniej na etapie produkcji silnika umożliwiają ocenę jakości uzwojenia. Badania izolacji uzwojeń silników prowadzone w oparciu o wykorzystanie najnowszej aparatury diagnostycznej należą do najtrudniejszych i najbardziej kosztownych.

Na badania stanu izolacji uzwojeń silników składają się:

1. ocena funkcjonalna układów izolacyjnych na etapie ich badań,
2. badania stanu izolacji uzwojeń w czasie ich produkcji,
3. próba napięciowa izolacji,
4. badania diagnostyczne stanu izolacji uzwojeń off-line (poza eksploatacją),
5. badania diagnostyczne stanu izolacji uzwojeń on-line (w czasie eksploatacji).

Ocena funkcjonalna układów izolacyjnych na etapie ich badań dotyczy etapu opracowań nowych rozwiązań układów izolacji. Zagadnienie przedstawiono w literaturze [11, 19].

Badania stanu izolacji uzwojeń w czasie ich produkcji w próbie pełnej obejmują: badania wytrzymałości elektrycznej, pomiar współczynnika strat dielektrycznych  $\tan\delta$ , pomiar wyładowań niezupełnych. Procedura uproszczona obejmuje: badania wytrzymałości elektrycznej oraz pomiar współczynnika strat dielektrycznych. Zagadnienie przedstawiono w literaturze [12, 15, 19, 21].

Miejsce szczególne w badaniach stanu izolacji uzwojeń silników zajmuje próba napięciowa. Celem próby napięciowej jest sprawdzenie prawidłowego wykonania układu izolacyjnego maszyny elektrycznej w szczególności WN. Pozytywny rezultat próby daje podstawę do stwierdzenia, że maszyna nie stanowi zagrożenia dla użytkownika. Jest to badanie obowiązkowe dla maszyny elektrycznej. Próbę taką musi przejść każdy wyrób elektryczny o napięciu znamionowym większym od 24 V [7, 9, 12, 13]. Procedura badawcza jest ściśle określona w normach [12]. Autorowi znane są z praktyki eksploatacji silników w przemyśle liczne przypadki, gdy próba napięciowa izolacji silnika została

przeprowadzona z wynikiem pozytywnym, a wkrótce po oddaniu do eksploatacji doszło do uszkodzenia izolacji silników, najczęściej na czołach uzwojenia. Oto jeden z przykładów. Użytkownik 6-letniego silnika o mocy 1 MW w trakcie kampanii remontowej w elektrowni poddał silnik przeglądowi. Przegląd obejmował między innymi oczyszczenie uzwojenia oraz suszenie. Następnie działając zgodnie z wytycznymi normy [12], wstępnie sprawdził stan izolacji i poddał silnik próbie napięciowej napięciem probierczym  $U_p=1,5U_N$ . Wynik próby okazał się pozytywny. Uzwojenie silnika czyste i suche. Silnik zamontowano na stanowisku pracy. W czasie pierwszego uruchomienia izolacja silnika uległa uszkodzeniu. Przypadków takich lub podobnych praktyka zna wiele. Stawia to pod znakiem zapytania zasadność stosowania próby napięciowej na silnikach z izolacją częściowo zużytą, ale sprawną i w dobrym stanie technicznym.

W ocenie autora próba napięciowa daje jedynie możliwość stwierdzenia, czy własności izolacji silnika w stanie statycznym - bezruchowym, osiągają pewien poziom, nie daje natomiast informacji o skali zagrożenia izolacji z powodu występujących w niej zjawisk elektrycznych. Próba napięciowa prowadzona zgodnie z wytycznymi normy [12] w silnikach starszych z izolacją częściowo zużytą w sposób zasadniczy pogłębia to zagrożenie. Praktyka dowodzi, że w interesie właściciela silnika, prób napięciowych izolacji prądem zmiennym, napięciem probierczym określonym przez normę [12] w silnikach z izolacją częściowo zużytą nie należy wykonywać. Wyjątkiem są odbiory porremontowe.

### ■ **Badania diagnostyczne stanu izolacji uzwojeń off-line**

Badanie stanu izolacji uzwojeń silników w szczególności WN prowadzone poza eksploatacją (off-line) jest podstawowym badaniem określającym stan

izolacji uzwojeń. Obserwując od wielu lat sposoby oceny izolacji uzwojeń silników w przemyśle krajowym i śledząc literaturę techniczną poświęconą temu zagadnieniu, autor usystematyzował rodzaje technik stosowanych przez oceniających stan izolacji uzwojeń silników indukcyjnych. Według wiedzy autora można tu wyróżnić następujące metody:

1. ocena na podstawie pomiarów wg norm krajowych, zaleceń branżowych i zakładowych [12, 13, 16],
2. metoda prof. Tadeusza Glinki na podstawie pomiarów napięciem stałym [6, 7],
3. wieloparametrowa metoda W. Witły [21],
4. metoda w oparciu o pomiary PI (wskaźnika polaryzacji), C (pojemności), SV (pomiar przy napięciu narastającym schodkowo), DD (rozładowanie dielektryka) - test Meggera [10],
5. metoda udarów napięciowych [19, 20, 21],
6. metoda rampy wysokonapięciowej, DC Ramp Test [19, 20],
7. metoda spektroskopii niskoczęstotliwościowej [18],
8. ocena na podstawie pomiarów wyładowań niezupełnych [1, 2, 5, 8, 14, 19, 20, 21].

Większość użytkowników silników indukcyjnych WN w przemyśle krajowym do oceny stanu izolacji silników stosuje tylko wskazania norm krajowych i ewentualnie zalecenia branżowe i zakładowe [12, 13, 16]. Normy i zalecenia określają wymagania w zakresie rezystancji izolacji uzwojeń stojana. Najważniejszym wymaganiem jest konieczność wykonania pomiarów rezystancji izolacji uzwojeń w warunkach określonych przez normę [12, 13].

Dla wyznaczenia stopnia zawilgocecia uzwojenia maszyny należy mierzyć rezystancję izolacji po upływie 15 i 60 sek. od momentu przyłożenia napięcia, R15 i R60. Miarą stopnia zawilgocecia jest stosunek R60/R15 nazywany współczynnikiem absorpcji. Dla maszyn dobrze wysuszonych wg normy [13] powinny być spełnione zależności:

$$\frac{R_{60}}{R_{15}} > \begin{cases} 1,5 & \text{przy temperaturze } 20^\circ \text{C} \\ 1,4 & \text{przy temperaturze } 40^\circ \text{C} \\ 1,3 & \text{przy temperaturze } 60^\circ \text{C} \end{cases} \quad (1)$$

Pomiar izolacji powinien być poprzedzony pomiarem rezystancji uzwojeń stojana, który jest podstawowym pomiarem w maszynach elektrycznych i transformatorach. Szczegóły i warunki tych pomiarów omawia w literaturze T. Glinka [7].

Norma [13] mówi, że rezystancje uzwojeń stojana powinny być zgodne z danymi wytwórcy, a w przypadku braku tych danych rezystancje faz uzwojeń nie powinny różnić się między sobą więcej niż o 2% największej wartości zmierzonej. Jest to kryterium symetrii uzwojeń silnika.

W literaturze [19] można spotkać również parametr DA (Dielectric Absorption), definiowany jako R60/R30. Poziom nieakceptowalny to  $DA \leq 1,25$ , akceptowalny  $DA \geq 1,5$ . Wg wiedzy autora parametr DA jest rzadko stosowany w praktyce przemysłowej.

Autor podziela opinię T. Glinki [6, 7], że kryterium (1) jest tylko wskaźnikiem zawilgocecia izolacji i informuje czy dany silnik należy przed włączeniem do pracy suszyć. Nie jest to kryterium określające stopień zużycia izolacji i porównywanie wartości współczynnika absorpcji przy kolejnych pomiarach nie może świadczyć o stopniu degradacji izolacji. W praktyce zdarza się, że kryterium (1) jest spełnione, izolacja sucha wręcz przesuszona, a jednocześnie całkowicie zużyta i silnik nie nadaje się do eksploatacji. Współczynnik absorpcji należy mierzyć przed uruchomieniem silnika po dłuższym postoju, w szczególności gdy zmieniły się warunki klimatyczne.

Przedstawione wyżej kryteria wydają się być niewystarczające. Mogą one dać jedynie zgrubną ocenę stanu izolacji i poinformować czy izolacja jest np. zawilgocona. Dla większości silników są to kryteria dotyczące izolacji głównej fazowej. Tylko dla niewielkiej grupy silników (najwyższych mocy), które mają dostępne końce uzwojeń fazowych,



pomiary wykonane zgodnie ze wskazaniami normy [13] umożliwiają ocenę izolacji głównej fazowej i międzyfazowej.

W niektórych zakładach produkujących i remontujących silniki indukcyjne WN, do oceny stanu ich izolacji wykonuje się pomiary współczynnika stratności  $tg\delta$ , podając napięcie zmienne o częstotliwości 50 Hz. Zagadnienie przedstawiono w literaturze [9].

Zdaniem autora pomiar  $tg\delta$  w istotny sposób wzbogaca informacje o stanie izolacji maszyn elektrycznych uzyskane z pomiarów wskazanych przez normy. Należy pamiętać [7], że wartości  $tg\delta$  izolacji można wyznaczyć tylko w przypadku układu o parametrach stałych. Jeżeli izolacja jest na tyle zużyta, że w schemacie zastępczym izolacji następuje ciągłe zwieranie i rozwieranie pojemności układ przestaje być układem o stałych parametrach, a kryterium  $tg\delta$  do oceny stanu izolacji nie powinno być stosowane.

W eksploatacji silników indukcyjnych WN, jak również innych maszyn elektrycznych pożądane są jednoznaczne kryteria pozwalające określić stopień zużycia izolacji. Służby utrzymania ruchu elektrycznego muszą mieć bazę odniesienia, na podstawie której można by porównywać proces starzenia się izolacji silników w kolejnych latach ich eksploatacji.

W rezultacie długoletnich badań, oceniając stan izolacji eksploatowanych w przemyśle krajowym maszyn elektrycznych, T. Glinka opracował metodę oceny stanu izolacji przy wykorzystaniu pomiarów napięciem stałym. [6, 7]. Metoda jest już na tyle uznana, że została wpisana do Polskiej Normy PN-E-04700 jako próba nieobowiązkowa [13].

Wyznaczone pomiarowo charakterystyki i parametry określają stan techniczny izolacji. W publikacjach poświęconych temu zagadnieniu, np. w [6, 7] podano kryteria oceny stanu izolacji w oparciu o wymienione wcześniej charakterystyki i parametry. Podany ocenom stanu technicznego izolacji, T. Glinka przypisuje również ocenę punktową stopnia zużycia, w klasyfikacji od 5

(bardzo dobra) do 0 (trwale uszkodzona) punktów. W ocenie autora największym walorem metody prądu stałego jest jej praktyczna użyteczność do oceny stopnia zużycia izolacji. W oparciu o wyniki badań, można przeprowadzić klasyfikację punktową stopnia zużycia izolacji głównej fazowej i ewentualnie międzyfazowej. Na tej podstawie, korzystając z doświadczeń autora metody, można prognozować, że silniki będą niezawodnie pracować tyle lat, ile wynosi ich ocena punktowa.

### ■ Badania własne w zakresie metod off-line

Dla oceny stanu izolacji uzwojeń silników off-line w przemyśle w latach 80. ub. w., autor prowadził pomiary stosując obowiązujące normy oraz zarządzenia i wytyczne [12, 13, 16]. Wielkości pomiarowe i kryteria ocen przedstawiono w pkt 6. Autor wielokrotnie miał do czynienia z sytuacją, gdy sposób oceny określony przez normy oraz zarządzenia i wytyczne wymienione wyżej zawodził i nie dawał możliwości oceny diagnostycznej izolacji badanych silników. Wykonane pomiary umożliwiały stwierdzenia, czy silnik ewentualnie sushyć przed uruchomieniem, nie było natomiast podstaw do klasyfikacji stopnia zużycia izolacji w silnikach.

Na początku lat 90. ub. w. dla potrzeb zespołu badawczego, którego autor był członkiem w porozumieniu z prof. Tadeuszem Glinką zaczęto do oceny stanu izolacji maszyn elektrycznych stosować Jego metodę prądu stałego. Stosując metodę prądu stałego, w ciągu kilkunastu lat zdiagnozowano ponad 100 silników WN, wzbogacając pomiary o oprogramowanie ułatwiające archiwizację wyników. Największym poligonem doświadczalnym były krajowe elektrownie i elektrociepłownie w tym w szczególności Elektrownia Opole.

Konieczność archiwizowania wyników na bieżąco w trakcie pomiarów stanu izolacji silników bezpośrednio na komputerze w postaci plików, koniecz-

ność zautomatyzowania pomiarów, przyjęcie opcji konieczności zwiększenia czasu pomiarów [10, 20], skierowała uwagę autora na pomiary stanu izolacji silników elektrycznych w tzw. teście Meggera - pomiary PI, C, DD i SV [10]. Jest to technika pomiarów, która umożliwia ocenę stanu izolacji głównej fazowej oraz międzyfazowej. Metoda ta bardzo dobrze sprawdza się w warunkach przemysłowych na całym świecie. Zdobywa sobie uznanie w krajowych zakładach przemysłowych. Autor stosuje ją z powodzeniem od kilkunastu lat [21, 22, 24], w wersji rozbudowanej sprzętowo i archiwizacyjnie w oparciu o miernik BM 25 od 2004 r. Test Meggera podobnie jak metoda prądu stałego jest metodą do oceny stanu izolacji głównej. Metody te nie dają możliwości oceny zwarć zwojowych.

Wnioski z badań silników z niesymetriami elektrycznymi prowadzone przez autora w przemyśle [20÷24] oraz analiza statystyk uszkodzeń silników, skierowały uwagę na podjęcie tematyki badań w zakresie wykrywania zwarć zwojowych. Pozyskanie silników, w których można było wprowadzić niesymetrię typu zwarcie uzwojenia stojana, skłoniło autora do podjęcia badań nad wykorzystaniem do celów diagnostycznych dla wykrywania zwarć zwojowych pobudzenia impulsowego. W tym celu w latach 1984-1985 w zespole badawczym podjęto prace nad wykorzystaniem prądowych generatorów impulsów (półsinusoidalnych) własnej konstrukcji do wykrywania zwarć w uzwojeniach stojanów silników niskonapięciowych [21].

W czasie badań generator przy obciążeniu:  $R=6+80 \Omega$  i  $L=10+400 \text{ mH}$  (badane uzwojenie stojana) podawał na badany obiekt impulsy w kształcie połowki sinusoidy o parametrach:

- amplituda prądu:  $I_{\text{imp}} \leq 15 \text{ A}$ ,
- amplituda napięcia:  $U_{\text{imp}} \approx 900 \text{ V}$ ,
- czas trwania impulsu  $t_0 \leq 0,5 \text{ ms}$ ,
- czas ewentualnej repetycji  $T = 60+300 \text{ ms}$ ,

Oszacowanie zakresu wzbudzenia do drgań uzwojenia stojana można prze-

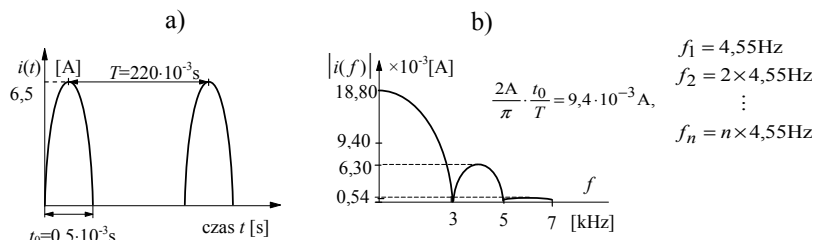
przewodząc, korzystając z prostej transformaty Fouriera [17]:

$$F(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j2\pi ft} dt. \quad (2)$$

Widmo ciągu impulsów w kształcie połówek sinusoid jest widmem prądkowym i zawiera składową o wartości  $2A/\pi \cdot t_0/T$  oraz składowe harmoniczne o częstotliwościach  $f_1, 2f_1, \dots, nf_1$  i amplitudach odpowiednio  $C_n$  [17]. Dla przykładowego silnika Sf 80 4A, uzwojenie pobudzone do drgań ciągiem uderów prądowych - ciągiem połówek sinusoid o następujących parametrach:  $t_0 = 0,5 \cdot 10^{-3}$  s. Na rys. 3 przedstawiono ciąg uderów prądowych i jego widmo.

Podając impuls prądowy z generatora i wykorzystując zmianę parametrów w uzwojeniu stojana silnika spowodowaną zwarcie (zmiana indukcyjności i pojemności), w silniku testowym Sf 80 4A - rys. 4 można było wykryć zwarcie 0,5% zwojów, czyli zwarcie 2 zwojów na 492 zwoje w uzwojeniu fazowym silnika. W stosunku do uzwojenia fazowego bez zwarcia ulegała zmianie częstotliwość odpowiedzi na impuls podany z generatora. Na rys. 4b pokazano odpowiedź uzwojenia stojana na pobudzenie impulsem dla uzwojenia fazowego bez zwarcia i ze zwarcie.

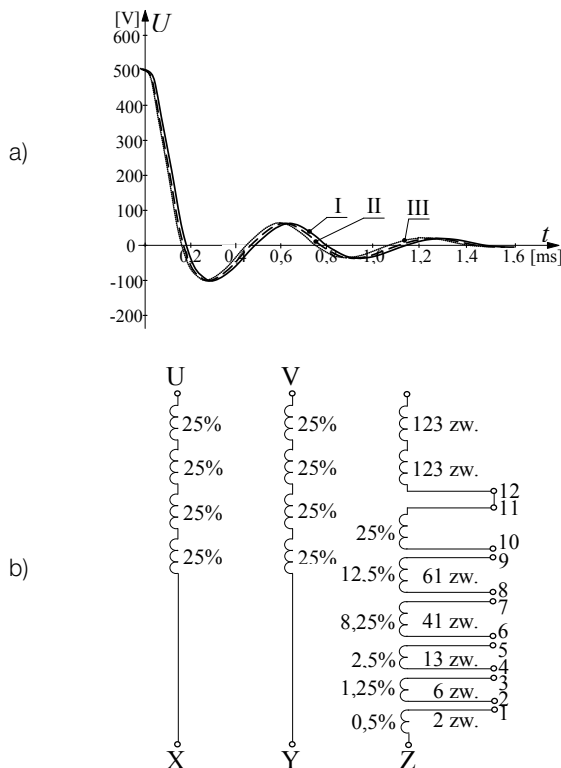
Wyraźnym ograniczeniem w stosowaniu metody pobudzenia impulsowego do oceny stanu izolacji silników w badaniach autora w latach 80-90. ub. w., były skromne możliwości techniczne wspomnianego generatora rodzimej konstrukcji oraz trudności w archiwizowaniu wyników pomiarów oraz w ich wzajemnym porównywaniu. Na rys. 5÷7 przedstawiono wyniki badań wykonane w 2006 r. na tym samym uzwojeniu silnika, nowoczesnym urządzeniem diagnostycznym firmy Baker. Urządzenie obok wizualizacji odpowiedzi badanego uzwojenia na pobudzenie impulsowe, wylicza różnice w częstotliwości oscylacji odpowiedzi dla poszczególnych przypadków pomiarowych - dla poszczególnych uzwojeń fazowych. Na rys. 5,7 widać wyraźne różnice w odpowiedzi uzwojeń fazowych stojana na pobudzenie do drgań impul-



Rys. 3. Impulsy prądowe pobudzające do drgań uzwojenie stojana silnika testowego: a) kształt ciągu impulsów, b) obwiednia widma amplitudowego

sem w zależności od stopnia niesymetrii. Różnice podano w procentach dla wzajemnych relacji okresów przebiegów napięciowych będących odpowiedzią na pobudzenie impulsem. Przez wzajemne porównanie odpowiedzi i określenie różnicy dla poszczególnych uzwojeń fazowych można diagnozować uzwojenie. Różnica w odpowiedzi przekłada się na asymetrię impedancji poszczególnych uzwojeń stojana. Producenci aparatury

diagnostycznej wykorzystującej metodę impulsową proponują współcześnie diagnozowanie przy wykorzystaniu impulsu napięciowego o czasie narastania nie przekraczającym 0,2 ms w zakresie od 10,90% napięcia szczytowego. Wartość szczytowa napięcia najczęściej jest w praktyce dobierana z zakresu  $UN_2UN + 1$  kV. Uznaje się, że dla takich warunków pomiarów asymetria impedancji uzwojeń nie powinna przekraczać 10%



Rys. 4. Silnik testowy Sf 80 4A: a) schemat uzwojenia stojana w badanym silniku, b) odpowiedź uzwojenia stojana na pobudzenie impulsem w silniku testowym: I dla uzwojenia fazowego bez zwarcia, II dla zwarcia 2 zwojów (0,5%), III dla zwarcia 123 zwojów (25%) na 492 zwoje w fazie

[25]. Dla wspomnianego silnika testowego już przy zwarcu 2 zwojów (0,5%) na 492 zwoje w uzwojeniu fazowym asymetria w porównaniu wynosiła 11% i 9% (rys. 6). Przy zwarcu 123 zwojów (25%), asymetria wynosiła 29% (rys. 7). Metoda diagnozowania stanu izolacji silników oparta na pobudzeniu impulsowym jest bardzo czuła. W przemyśle krajowym dopiero współcześnie zdobywa zaufanie. Metoda uderzeń napięciowych jest metodą porównawczą, daje możliwość oceny izolacji zwojowej, międzyfazowej i głównej. W trakcie pomiarów uzwojenie, które ma być badane, jest pobudzane do drgań udarem napięciowym powstałym przez rozładowanie kondensatora impulsowego  $C_s$  o znanej pojemności, wcześniej naładowanego do wymaganego napięcia z regulowanego źródła napięcia stałego. Schemat blokowy układu pomiarowego przedstawia rys. 8. Po pobudzeniu do drgań badanego uzwojenia krótkotrwałym impulsem, rejestruje się jego zanik i analizuje tłumiony oscylacyjny przebieg napięcia na badanym uzwojeniu. Uzyskany przebieg ma częstotliwość (pseudoczęstotliwość) wyrażoną wzorem [21]:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_s + C_b)}} \quad (3)$$

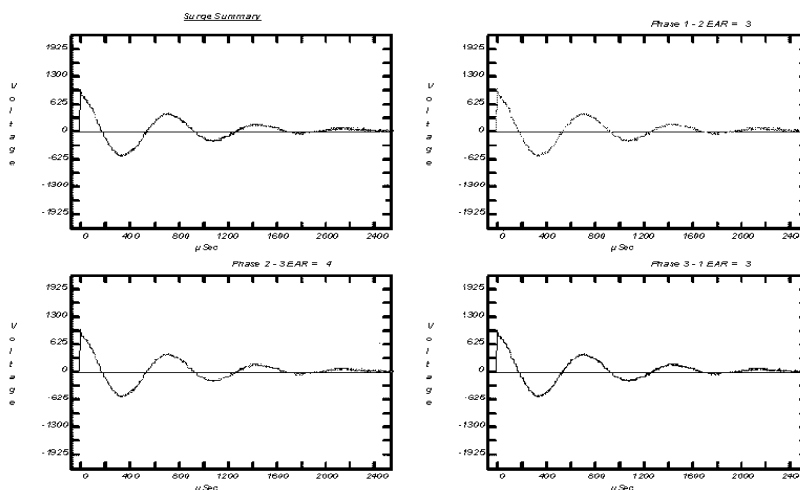
gdzie:

L - indukcyjność badanego uzwojenia,

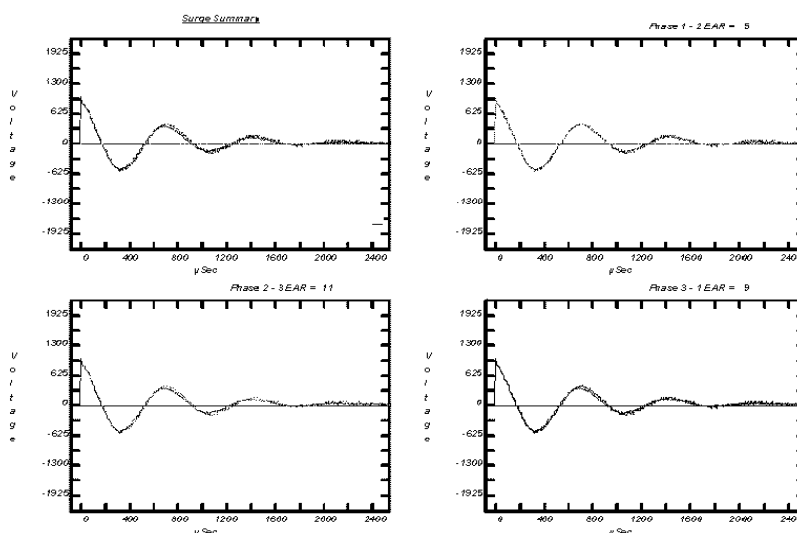
$C_b$  - pojemność badanego uzwojenia,

$C_s$  - pojemność kondensatora impulsowego urządzenia.

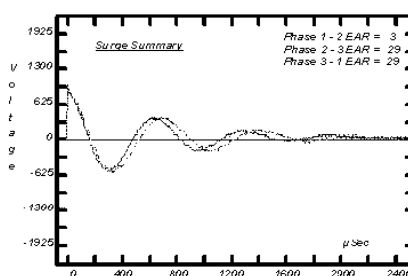
Typowa częstotliwość oscylacji zawiera się pomiędzy kilkoma kHz a 200 kHz [21]. Uszkodzenia izolacji uzwojenia, zwarcie w uzwojeniu, powoduje zmianę indukcyjności L i pojemności  $C_b$ , a tym samym częstotliwości oscylacji  $f$  (10). W pamięci urządzenia pomiarowego przechowuje się przebiegi referencyjne uzyskane dla uzwojeń wzorcowych, wyniki pomiarów uzyskane przy odbiorze silnika dla izolacji nowej. Dla bieżącej oceny stanu izolacji przeprowadza się porównania wyników otrzymanych



Rys. 5. Odpowiedź uzwojenia stojana na pobudzenie impulsem w silniku testowym dla uzwojeń fazowych bez zwarcia: a) wszystkie 3 fazy, b) porównanie fazy 1 i 2, c) porównanie fazy 2 i 3, d) porównanie fazy 3 i 1



Rys. 6. Odpowiedź uzwojenia stojana na pobudzenie impulsem w silniku testowym dla zwarcia 2 zwojów (0,5%) na 492 zwoje w fazie 3: a) wszystkie 3 fazy, b) porównanie fazy 1 i 2, c) porównanie fazy 2 i 3, d) porównanie fazy 3 i 1



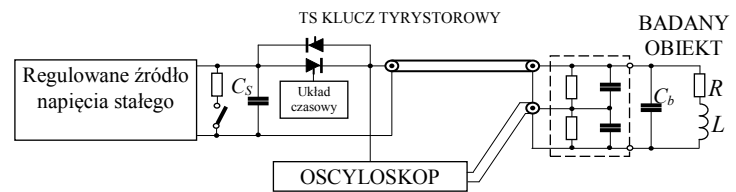
Rys. 7. Odpowiedź uzwojenia stojana na pobudzenie impulsem w silniku testowym dla zwarcia 123 zwojów (25%) na 492 zwoje w fazie 3, porównanie wszystkich 3 faz

na bieżąco z wynikami wcześniejszymi.

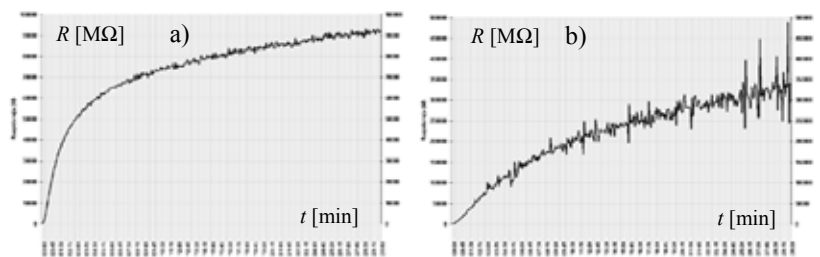
Dla przybliżenia realiów diagnostowania stanu izolacji silników w warunkach przemysłowych, poniżej przedstawiono trzy charakterystyczne przykłady:

1. Spośród 2 silników 8-letnich tego samego typu o mocy 400 kW, 6 kV, izol. B, wykonanych przez tego samego producenta, w tym samym czasie, należało wybrać silnik lepszy, który przepracuje co najmniej rok czasu bez awarii na napędzie młyna węgla w jednej z elektrociepłowni. Autor wykonał pomiary izolacji obydwu silników testem Meggera. Najciekawszy wynik pomiaru, charakterystyka  $R=f(t)$  w okresie czasu 30 min - rys. 9a i b pokazuje wyraźną różnicę w stanie izolacji obydwu silników na korzyść silnika nr 1. Silniki różnią się wartościami  $R_{60}$  i  $R_{600}$ , ale przede wszystkim różni je kształt charakterystyki  $R(t)$ . Silnik nr 2 w czasie pomiaru ma wyraźne wahania wartości  $R$  w funkcji czasu (wahania prądu), jego izolacja jest zużyta. Do pracy w napędzie młyna wybrano silnik nr 1. Silnik nr 2 wytypowano do przeglądu, a następnie remontu. Decyzje okazały się trafne.

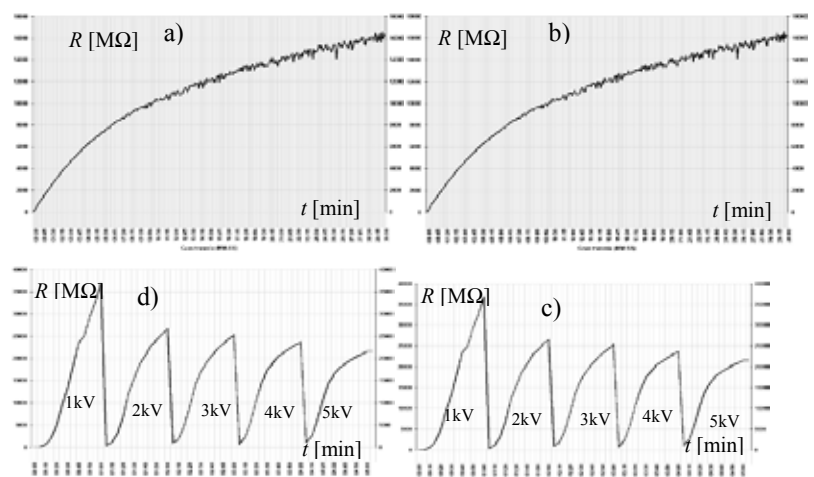
2. Silnik o mocy 1,4 MW, 6 kV, izol. F uległ poważnej awarii, doszło do przytarcia wirnika o stojan na skutek uszkodzenia łożyska tocznego. Obsługa w krótkim czasie wyłączyła silnik z eksploatacji. Po awarii wykonano pomiary stanu izolacji uzwojeń silnika testem Meggera. Wszystkie wyniki pomiarów - rys. 10 były bardzo dobre, wręcz takie jak krótko przed awarią  $R_{60}=1,62$  GW,  $R_{600}=9,99$  GW,  $R_{600}/R_{60}=6,17$ ,  $DD=1,65$ ,  $C=0,42$  mF. Nic nie wskazywało na jakiegokolwiek uszkodzenie izolacji. Kolejnym etapem badań było sprawdzenie uzwojeń stojana przez pobudzenie do drgań impulsem. Wyniki testu pobudzenia wskazały na uszkodzenia izolacji zwojowej w jednym z uzwojeń fazowych - rys.11. Asymetria odpowiedzi pomiędzy fazą 3-1 była rzędu 19%. Silnik skierowano do zakładu remontowego. Podczas remontu okazało się, że obok uszkodzenia węzła łożyskowego uszkodzeniu uległa izolacja na wyjściu uzwojenia ze żłobka w jednej



Rys. 8. Schemat blokowy układu pomiarowego do badania stanu izolacji metodą uderzenia napięciowego [21]



Rys. 9. Rezystancja izolacji głównej fazowej w funkcji czasu,  $R=f(t)$  dla dwóch silników tego samego typu o mocy 400 kW, 6 kV, 740 obr/min, izol. B, napięcie probiercze 2500 V: a) silnik nr 1 z izolacją lepszą, b) silnik nr 2 z izolacją zużyłą

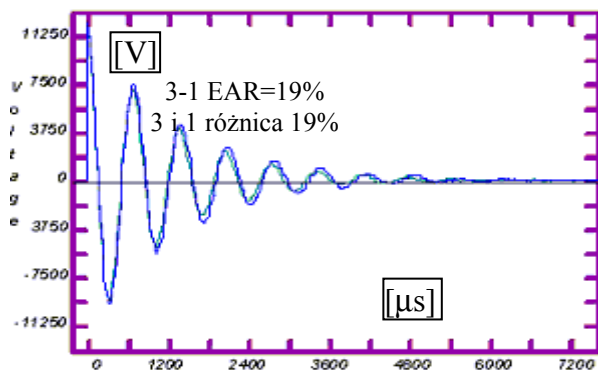


Rys. 10. Diagnostyka stanu izolacji silnika o mocy 1,4 MW, 6 kV, izol. F: a) pomiar  $R$ , przed awarią, b) pomiar  $R$ , po awarii, c) pomiar SV, 5 min, 5000 V, przed awarią, d) pomiar SV, 5 min, 5000 V, po awarii

z faz, około 1 cm poza żłobkiem. W lokalizacji takiego miejsca z uszkodzoną izolacją zwojową bardzo pomocnym są lokalizatory typu sonda do wzn [21]. Autor właśnie na przykładzie tego silnika miał okazję sprawdzić przydatność detektora wzn, który wyposażony w sondę wzn pozwolił na szybką lokalizację miejsca wyładowań na stojanie, przy podaniu na badaną fazę napięcia rzędu 4,5 kV.

3. Kolejnym ciekawym przykładem konieczności stosowania metody impulsowej do diagnostyki stanu izolacji uzwojeń był silnik o mocy 800 kW, 6 kV, z napędem pompy w jednej z elektrociepłowni. Test Meggera nie wykrył uszkodzenia izolacji, badanie uzwojeń przy użyciu testu impulsowego dało podstawę do skierowania silnika do remontu ze względu na uszkodzenie izolacji zwojowej - rys. 12a.





Rys. 11. Diagnostyka stanu izolacji silnika o mocy 1,4 MW, 6 kV, izol. F, odpowiedź uzwojeń na pobudzenie impulsem, porównanie fazy 3 i 1, asymetria odpowiedzi 19%

Asymetria odpowiedzi uzwojenia fazy 2 i 3 osiągnęła 100%. Silnik skierowano do remontu. Okazało się, że doszło do zwarcia zwojowego w części czołowej. Uszkodzenie udało się usunąć bez przewajania silnika, naprawa obejmowała uszkodzony fragment uszkodzenia uzwojenia. Po naprawieniu silnika wykonano pomiary kontrolne uzwojenia. Wyniki przedstawiono na rys. 12b. Asymetria odpowiedzi uzwojenia fazy 2 i 3 zmalała do 4%. Uznano, że naprawa uzwojenia została wykonana prawidłowo.

W ocenie autora, elementem stosunkowo nowym w badaniach stanu izolacji silników off-line w przemyśle krajowym są metody wykorzystujące pomiar wyładowań niezupełnych - wnz. Metody te są co raz częściej stosowane w badaniach stanu izolacji silników na zachodzie. W literaturze można nawet spotkać pogląd, że wynik pomiaru wnz jest podstawowym wskaźnikiem stanu izolacji elektrycznej [19]. Faktem jest, że rozszerza się ujęty normami zakres urzą-

dzeń, w których badanie poziomu wnz jest obligatoryjne [5, 19]. Metody badań wnz dają możliwość oceny jakości technologii wykonania izolacji np. przy produkcji kabli, generatorów, silników. Są to metody bardzo drogie, ze względu na koszt koniecznej do badań aparatury oraz bardzo kłopotliwe ze względu na wpływ zakłóceń przemysłowych na wyniki pomiarów. Skuteczne ograniczenie wpływu zakłóceń jest możliwe [5, 19, 21], ale kosztowne i wyraźnie obniża użyteczność metod w opinii jej potencjalnych użytkowników.

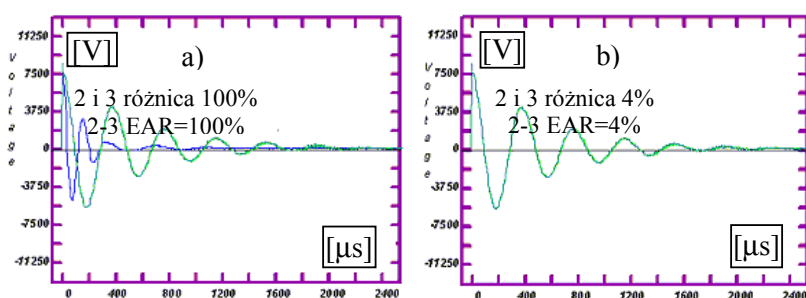
Silniki na postoju w trakcie badań off-line mają układ izolacyjny naprężony tylko elektrycznie. Wszystkie elementy uzwojenia silnika znajdują się pod jednakowym napięciem - napięciem probierczym. Daje to możliwość sprawdzenia dla takich samych warunków napięcia elektrycznego całego uzwojenia silnika. Analiza rozkładów fazowo-rozdzielczych przy pomiarach wnz daje możliwość określenia źródeł wyładowań, a tym sa-

mym źródeł anomalii w układzie izolacyjnym silników [5, 19, 20, 21].

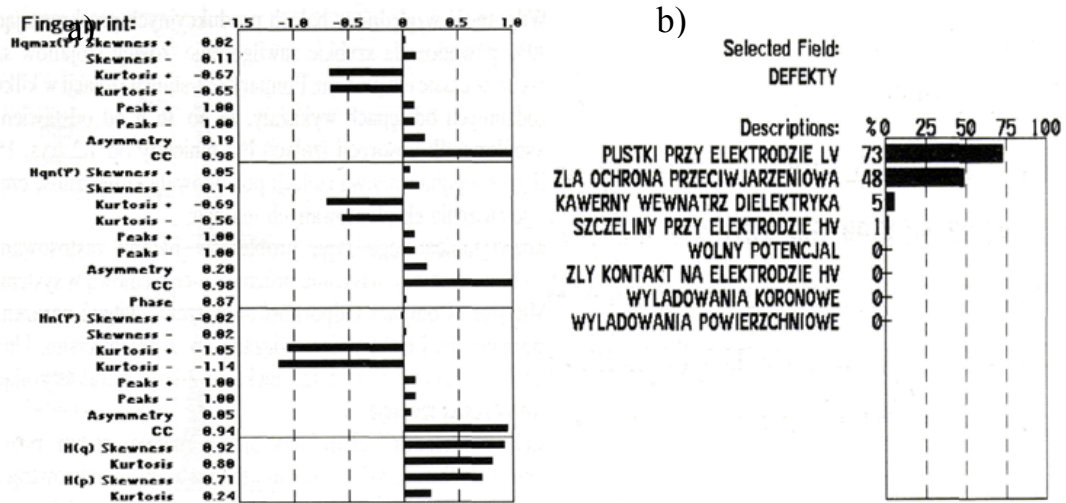
Bardzo przydatną praktycznie w diagnozowaniu stanu izolacji silników w oparciu o pomiary wnz jest możliwość skorzystania z baz wiedzy producenta silnika (jeżeli takową posiada) oraz producenta aparatury do pomiarów i analizy wyładowań niezupełnych. Przykładowo, gdy producentem lub współproducentem aparatury jest szwajcarska firma HAEFELY można korzystać z systemu opartego o „fingerprint”. System umożliwia tworzenie bazy danych w oparciu o numeryczny opis uzyskanych wyników pomiarów za pomocą 29 statystycznych operatorów obrazujących wnz badanej maszyny oraz banku defektów modelowych izolacji [5].

Cyfrowy zapis wyników badań wnz pozwala na porównanie ze sobą systematycznie uzyskanych wyników, ocenę błędów i automatyczną identyfikację defektów izolacji z dużym prawdopodobieństwem. Dzięki temu można obserwować procesy starzeniowe izolacji i oceniać na bieżąco stopień jej degradacji w miarę upływu lat eksploatacji. Na rys. 13a przedstawiono za [2] wynik pomiaru wnz dla przykładowego silnika elektrycznego, jako obraz „fingerprint”. Rys. 13b podaje klasyfikację obrazu wnz tego silnika na podstawie banku danych. Z pomiarów wnz przykładowego silnika wynika, że z prawdopodobieństwem dużym, sięgającym 73% wnioskować można o wystąpieniu pustek przy elektrodzie niskiego napięcia czyli przy żelazie, z prawdopodobieństwem 48%, że ma miejsce zła ochrona przeciwjarzeniowa oraz z nieznacznym podobieństwem bo 5%, że występują kawerny wewnątrz dielektryka. Jest to bardzo kompetentna ocena stanu izolacji silnika na podstawie pomiarów off-line. Wzbogacając tą ocenę o wyniki pomiarów on-line, jeżeli takowe można wykonać, jesteśmy przygotowani do oceny diagnostycznej stanu izolacji silnika.

Dla uzyskania doświadczeń praktycznych w stosowaniu metod pomiaru wnz dla oceny stanu izolacji silników off-line, autor uczestniczył w serii po-



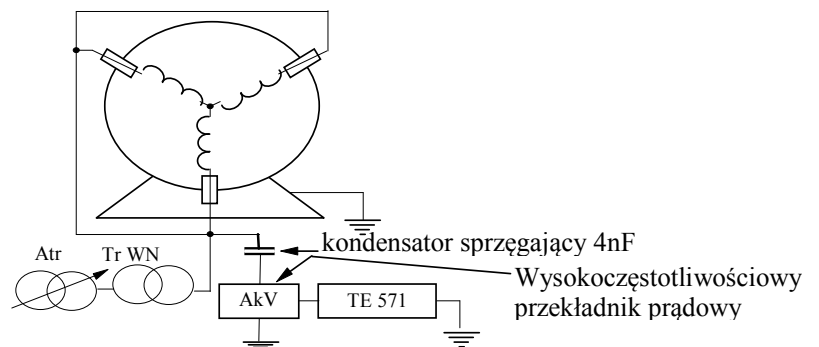
Rys. 12. Odpowiedź uzwojenia stojana na pobudzenie impulsem, porównanie fazy 2 i 3, silnik o mocy 800 kW, 6 kV: a) po wystąpieniu uszkodzenia, b) po naprawie uzwojenia



Rys. 13. Wynik badań wnz przykładowego silnika: a) „fingerprint”, b) klasyfikacja obrazu wnz silnika na podstawie banku danych firmy HAEFELY [2]

miarów diagnostycznych w kilku krajowych elektrowniach i elektrociepłowniach. W artykule przedstawiono dla przykładu wyniki pomiarów dla 2 silników. Po badaniach metodą wnz silniki przebadano metodą T. Glinki. Pomiary wnz wykonano w układzie pomiarowym z rys. 14, podając napięcie probiercze zmienne przez czas 2 min. W czasie pomiarów dokładnie kontrolowano środowisko pomiarowe i w miarę możliwości eliminowano wszelkie zakłócenia mogące negatywnie wpływać na wynik pomiarów. Pomiary wykonywano w dni wolne od pracy, starano się utrzymać tło na poziomie około 10 pC, wnz mierzono w paśmie 40,400 kHz.

1. Silnik o mocy 320 kW, 6 kV, izol. F, napęd pompy w jednej z elektrowni. Wyniki pomiarów wnz przedstawiono na rys. 15a÷d. Wyniki pomiarów wnz silnika są dobre. Ładunek wyładowań jest na poziomie 2 nC, a więc jest mały. Kształty charakterystyk z rys. 15 również nie budzą zastrzeżeń. Rozkład gęstości ładunku - rys. 15a przyjmuje kształt o jednym szczycie łagodnie obniżającym się. Obraz trójwymiarowy - rys. 15d prezentujący liczbę wyładowań wnz w zależności od fazy napięcia probierczego i ładunku wnz ma kształt podkowy co również jest cechą pozytywną [19]. Dla uzyskania możliwości porównania wyni-



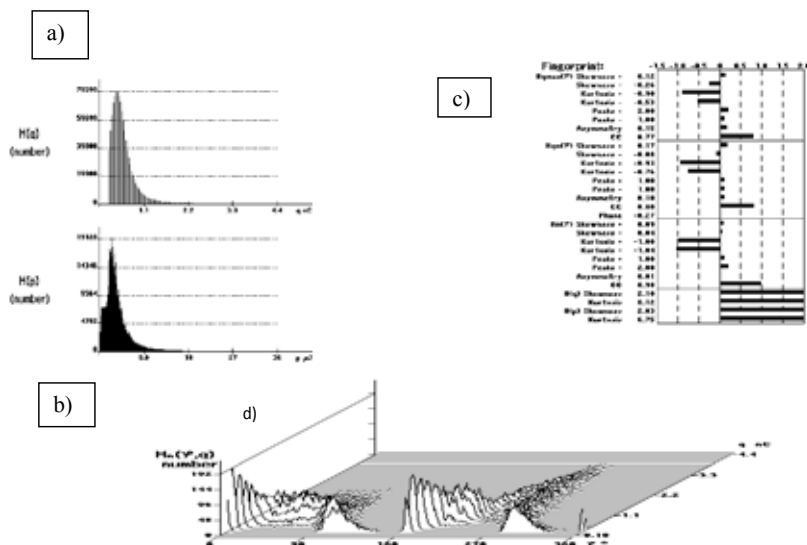
Rys. 14. Schemat blokowy układu pomiarowego przy badaniach stanu izolacji silników w warunkach off-line napięciem zmiennym przy wykorzystaniu aparatury TE 571 firmy HAEFELY

ków pomiarów w przyszłych pomiarach przeprowadzono klasyfikację obrazów wnz na podstawie analizy „fingerprint” (odcisku palca) - rys. 15c.

Po pomiarach wnz silnik przebadano metodą T. Glinki. W oparciu o kryterium metody prądu stałego wystawiono mu ocenę dobrą, liczba punktów 4. Pomiar stanu izolacji silnika metodą wnz i metodą prądu stałego wystawia izolacji ocenę dobrą.

2. Silnik o mocy 630 kW, 6 kV, izolacja F, napęd pompy w jednej z elektrowni. Wyniki pomiarów wnz przedstawiono na rys. 16a÷c. Wyniki pomiarów wnz wystawiają silnikowi ocenę nega-

tywną. Silnik ma bardzo wysoki poziom wyładowań wnz. Już przy napięciu probierczym 3,9 kV ładunek maksymalny qmax osiąga bardzo wysoki poziom 48 nC. Charakterystyki wnz mają kształty w znacznym stopniu odbiegające od regularności. Charakterystyki z rys. 16a są przykładem nieregularnego obrazu PD. W rozkładzie intensywności wnz występuje więcej niż jedno maksimum. Również rozkłady fazowo-rozdzielcze powinny być bardziej regularne - rys. 16b. Zwłaszcza rozkład Hqmax nie ma sinusoidalnej obwiedni. Wysoki poziom wnz każe przypuszczać, że izolacja silnika jest zużyta. Pomiary wnz silnika prze-



Rys. 15. Pomiary wz, silnik o mocy 320 kW, 6 kV, izol. F, napięcie probiercze zmienne 6 kV: a) charakterystyka liczby wyładowań w zależności od wielkości wyładowań  $H=f(q)$ , b) charakterystyka liczby wyładowań w zależności od energii wyładowań  $H=f(p)$ , c) „fingerprint”, d) charakterystyka liczby wyładowań w zależności od fazy i intensywności  $H=f(j, q)$

rwano przy napięciu probierczym 3,9 kV. Postawiono izolację przebadaną metodą T. Glinki. Wynik oceny był negatywny, liczba punktów 2. Silnik miał zbyt niskie napięcie przebicia izolacji - z ekstrapolacji 11 kV. Ponieważ sytuacja ruchowa w elektrowni wymagała aby silnik pracował, silnik uruchomiono. Po roku eksploatacji, wyniki pomiarów stanu izolacji silnika metodą prądu stałego były tak złe, że silnik skierowano do przezwojenia. Analizując ten przypadek, można mówić o wzajemnej zbieżności wyników pomiarów metodą wz i metodą prądu stałego.

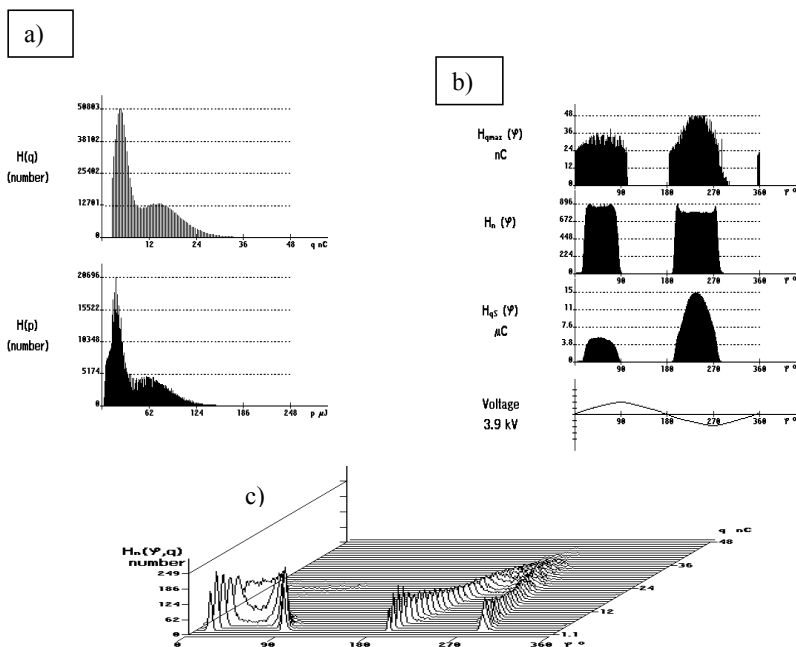
### Uwagi i wnioski końcowe

W artykule przedstawiono wyniki badań własnych autora w zakresie ustalenia przyczyn uszkodzenia się izolacji uzwojeń silników i diagnostyki off-line izolacji uzwojeń silników. Stwierdzono że:

a) Uszkodzenia izolacji uzwojeń stojanów należą do najczęstszych przyczyn awarii oraz nieplanowanych postojów silników w przemyśle.

b) Przedstawiono ocenę własną przyczyn występowania uszkodzeń oraz rodzaje uszkodzeń izolacji uzwojeń silników. Badanie stanu izolacji uzwojeń silników off-line jest podstawowym, najważniejszym badaniem określającym stan izolacji uzwojeń. Jest to również w ocenie autora najważniejsze badanie silnika z punktu widzenia jego eksploatacji.

c) Autor uważa, że silniki z izolacją częściowo zużyta nie powinny być poddawane próbie napięciowej prądem zmiennym, napięciem probierczym określonym przez normę [27]. Praktyka przemysłowa dowodzi, że próba napięciowa daje jedynie możliwość stwierdzenia, czy własności izolacji uzwojenia silnika w stanie statycznym osiągają pewien poziom, nie daje natomiast informacji o skali zagrożenia izolacji z powodu występujących w niej zjawisk elektrycznych. Dla silników starszych z izolacją częściowo zużyta, próba napięciowa w sposób zasadniczy to zagrożenie pogłębia.



Rys. 16. Pomiary wz, silnik o mocy 630 kW, 6 kV, izol. F, napięcie probiercze zmienne 3,9 kV: a) rozkład liczby wyładowań w funkcji ładunku  $q$  i energii  $p$ , b) parametry  $q_{max}$  - ładunku maksymalnego,  $n$  - liczby wyładowań,  $q_s$  - ładunku średniego w funkcji fazy napięcia probierczego, c) trójwymiarowy obraz wyładowań  $Hn=f(j, q)$ , w zależności od fazy i intensywności

d) Kryterium  $R60/R15 > 1,3 \div 1,5$  (1), dotyczące wartość współczynnika absorpcji jest tylko wskaźnikiem zawilgożenia izolacji i informuje, czy dany silnik należy przed włączeniem do pracy suszyć. Nie jest to kryterium odnośnie stopnia zużycia izolacji i porównywanie wartości współczynnika absorpcji przy kolejnych pomiarach nie może świadczyć o stopniu degradacji izolacji.

e) Metoda oceny stanu izolacji uzwojeń silników off-line w warunkach przemysłowych powinna być kompleksowa. Powinna obok oceny izolacji głównej fazowej i międzyfazowej - metoda T. Glinki, test Meggera, zawierać ocenę izolacji zwojowej. Sprawdzonej metodą oceny izolacji zwojowej jest test impulsowy. Umożliwia on: wykrycie uszkodzenia izolacji zwojowej, wykrycie zwarcia zwojowego, przez pomiar asymetrii impedancji poszczególnych uzwojeń fazowych w trakcie ich pobudzania do drgań. Należy bardzo mocno podkreślić, że zastosowanie metody prądu stałego do oceny stanu izolacji głównej daje możliwość oceny stopnia zużycia tej izolacji, przypisuje silnikowi ocenę punktową i pozwala prognozować okres jego eksploatacji ze względu na izolację uzwojenia. Zastosowanie testu Meggera do oceny stanu izolacji głównej takiej możliwości nie daje.

f) Autor stwierdza dużą przydatność do oceny stanu izolacji off-line silników pomiarów wylądowań niepełnych - wnz. Pomiary te umożliwiają określenie jakości izolacji silnika nowego lub po remoncie w ramach tzw. pomiarów odbiorczych, oraz określenie stopnia zużycia izolacji na silniku już eksploatowanym. Wykorzystanie bazy wiedzy własnej oraz producenta aparatury diagnostycznej, ułatwia postawienie diagnozy. Ograniczeniem w stosowaniu metody poza znacznymi kosztami aparatury firmowej mogą być duże poziomy zakłóceń.

g) Ocena stanu izolacji uzwojeń silników off-line powinna być prowadzona przede wszystkim w oparciu o trend zmian wielkości i parametrów mierzonych. Charakter zmian tych wielkości w czasie upoważnia do podjęcia kompetentnej oceny izolacji. □

#### Literatura

- [1] ADWEL: *PD monitoring, Nota Aplikacyjna 2003.*
- [2] Biernacki A., Zielonka A.: *Metody diagnozowania stanu izolacji silników elektrycznych wysokiego napięcia* "Wiadomości Elektrotechniczne 1996, nr 12.
- [3] Dąbrowski M.: *Konstrukcja maszyn elektrycznych.* WNT, Warszawa, 1965, 1997.
- [4] Drak B.: *Przyczyny awarii silników potrzeb własnych elektrowni blokowych i elektrociepłowni.* Wyd. BOBRME, Katowice 2000, *Maszyny Elektryczne*, nr 61, 2000, str. 11-16.
- [5] Florkowska B., Florkowski M., Włodek R., Zydrón P.: *Mechanizmy, pomiary i analiza wylądowań niepełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia.* Wyd. IPPT PAN, Warszawa 2001.
- [6] Glinka T.: *Klasyfikacja stopnia zużycia izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych.* Wyd. BOBRME, Katowice 2004, *Maszyny Elektryczne*, nr 68, 2004, str. 13-18.
- [7] Glinka T.: *Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle.* Wyd. BOBRME, Katowice 1998.
- [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] IEEE Standards. *IEEE Recommended Practice for Insulation testing of Electric Machinery (2300V and Above) With High Direct Voltage.*
- [10] Megger: *The Complete Guide to Electrical Insulation Testing.* AVO International 2001.
- [11] PN-EN 60034-18-1. *Maszyny elektryczne wirujące. Ocena funkcjonalna układów izolacyjnych.*
- [12] PN-88/E-06701. *Maszyny elektryczne wirujące. Ogólne wymagania i badania.*
- [13] PN-98/E-04700. *Urządzenia i układy elektryczne. Wytyczne przeprowadzenia pomontażowych badań odbiorczych.*
- [14] PN-EN 60270. *Wysokonapięciowa technika probiercza. Pomiary wylądowań niepełnych.*
- [15] Proczek M.: *Układ izolacyjny dla stojanów silników wysokiego napięcia.* Wyd. BOBRME, Katowice 1992, *Maszyny Elektryczne*, nr 45, 1992.
- [16] *Przepisy eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych. Dział I, zeszyt 8. Eksploatacja elektrycznych urządzeń napędowych.* Wyd. Instytut Energetyki, Warszawa 1988.
- [17] Sobkowski J.: *Częstotliwościowa analiza sygnałów.* Wyd. MON, Warszawa, 1975.
- [18] Subocz J.: *Wybrane zagadnienia przewodnictwa i relaksacji dielektrycznej w aspekcie diagnostyki izolacji kompozytowej.* Monografia, *Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej nr 580, Instytut Elektrotechniki nr 30, Szczecin 2003.*
- [19] Stone G.C., Boulter E.A., Culbert I., Dhirani H.: *Electrical insulation for rotating machines.* IEEE PRESS series on Power Engineering, USA, 2004.
- [20] Szymaniec S.: *Diagnostyka stanu izolacji silników indukcyjnych wysokonapięciowych off-line w przemyśle.* Wyd. BOBRME, Katowice 2005, *Maszyny Elektryczne*, nr 71, 2005, str. 77-82.
- [21] 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.*
- [22] Szymaniec S.: *Uszkodzenia i diagnostyka off-line izolacji uzwojeń silników w napędach potrzeb własnych w energetyce.* *Archiwum Energetyki*, tom XXXVIII, 2008, nr1, str. 3-42.
- [23] Szymaniec S.: *Diagnostyka off-line izolacji uzwojeń silników indukcyjnych klatkowych WN w oparciu o metodę uderzeń napięciowych.* *Wiadomości Elektrotechniczne*, 2008, nr 12, str. 20-26.
- [24] Szymaniec S.: *Badania, eksploatacja i diagnostyka zespołów maszynowych z silnikami indukcyjnymi klatkowymi.* Wyd. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej 2013, Opole, *Studia i Monografie*, zeszyt 333.
- [25] Wierzbicka B., Wierzbicki J.: *Tester impulsowy IT 6. Noty aplikacyjne firmy SEITZ Inst.*