

# Badania stanu izolacji uzwojeń silników elektrycznych

Sławomir Szymaniec, Marek Kacperak

Badania izolacji uzwojeń silników elektrycznych są badaniami podstawowymi. Wyniki badań decydują o dopuszczeniu silnika do eksploatacji, a na etapie produkcji silnika umożliwiają ocenę jakości uzwojenia.

## 1. Próba napięciowa izolacji

Maszyny nowe oraz całkowicie przezwojone powinny być badane pełnym napięciem probierczym  $U_p$  [185], które dla maszyn o  $U_N = 6$  kV wynosi  $U_p = 13$  kV, zgodnie ze wzorem:

$$U_p = 2U_N + 1 \text{ [kV]} \quad (1)$$

Silniki z uzwojeniem częściowo przezwojonym należy badać napięciem  $0,75U_p$ , wcześniej należy stare uzwojenie starannie wyczyścić i wysuszyć [185].

Rezystancja izolacji przy napięciu znamionowym, zmierzona bezpośrednio po próbie napięciowej nie powinna być mniejsza niż 80% wartości zmierzonej przed próbą [185].

Przeprowadzając próby napięciowe izolacji, sprawdza się minimalną wytrzymałość elektryczną izolacji uzwojeń. Próby te obejmują wszystkie elementy izolacji głównej (doziemnej). Jeżeli próba przeprowadzona jest osobno dla każdego uzwojenia fazowego, przy pozostałych uzwojeniach połączonych z kadłubem silnika, to obejmuje również izolację międzyfazową. Przyłożone napięcie probiercze powinno być wystarczające do wykrycia ewentualnego osłabienia izolacji, co mogłoby w przyszłości skutkować awarią silnika. Ewentualne osłabienie może się pojawić np. w czasie uzwojania stojana, przy montażu cewki w żłobku. Elementy układu izolacyjnego są poddawane działaniom sił, które mogą stanowić tzw. narażenia mechaniczne obniżające wytrzymałość elektryczną (zagadnienia te są przedstawione w literaturze [247, 248, 266]). Skutkuje to koniecznością obniżenia napięcia probierczego w badaniach kontrolnych uzwojenia w czasie produkcji silnika. Napięcie probiercze dla kolejnego etapu prób również powinno być obniżone. Właściwy dobór napięcia próby napięciowej decyduje o celowości i zasadności próby. Celem próby powinno być wskazanie osłabionych miejsc układów izolacyjnych bez niepotrzebnego narażenia izolacji elementów uzwojeń mającej w chwili próby dostateczny zapas wytrzymałości elektrycznej.

Z praktyki znane są 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 kilkunastoletniego silnika o mocy 4,4 MW w trakcie kampanii remontowej w zakładzie poddał silnik przeglądowi. Przegląd obejmował między innymi



Rys. 1. Co „zostało z uzwojenia” silnika o mocy 4,4 MW po próbie napięciowej

oczyszczenie uzwojenia oraz suszenie. Następnie, działając zgodnie z wytycznymi normy [185], wstępnie sprawdził stan izolacji i poddał silnik próbie napięciowej napięciem probierczym  $U_p = 1,5U_N$ . Wynik próby okazał się negatywny – rys. 1. Izolacja silnika uległa uszkodzeniu. Silnik przezwojono, uzwojenie sprowadzono od zagranicznego producenta silnika. Przypadków takich lub podobnych praktyka zna wiele. Stawia to pod znakiem zapytania zasadność stosowania próby napięciowej na silnikach z izolacją częściowo zużyta, ale sprawna i w dobrym stanie technicznym.

Próba napięciowa daje jedynie możliwość stwierdzenia, czy właściwości 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 [185] w starszych silnikach, z izolacją częściowo zużyta, w sposób zasadniczy pogłębia to zagrożenie. Praktyka dowodzi, że w interesie właściciela silnika w silnikach z izolacją częściowo zużyta nie należy wykonywać prób napięciowych izolacji prądem zmiennym, napięciem probierczym określonym przez normę [185]. Wyjątkiem są odbiory poremontowe [76÷79, 266].

## 2. Próba izolacji zwojów

Próba izolacji zwojów nie jest uważana za konieczną, ale może być wykonana. Wykonuje się ją w ramach badań pełnych. Zgodnie z normą izolacja zwojów powinna wytrzymać przez 3 min napięcie probiercze  $1,3 U_N$ . Szczegóły i warunki pomiarów przedstawiono w normie [185].

## 2.1. Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń off-line (poza eksploatacją)

Badanie stanu izolacji uzwojeń silników, w szczególności WN, prowadzone poza miejscem eksploatacji (off-line) jest podstawowym badaniem określającym stan izolacji. Obserwując od wielu lat sposoby oceny izolacji uzwojeń silników w przemyśle krajowym i śledząc literaturę techniczną poświęconą temu zagadnieniu [1÷9, 17÷23, 25, 33, 34, 37, 40÷42, 45÷49, 57÷73, 75÷82, 84, 88÷97, 105÷109, 112, 113, 115÷129, 131, 140÷142, 145, 148, 149, 154, 155÷160, 162, 163, 165÷174, 180÷190, 193, 195÷198, 200÷211, 233, 236÷239, 244÷270, 275÷291, 293, 296÷306, 309÷314, 315], autorzy usystematyzowali rodzaje technik stosowanych przez oceniających stan izolacji uzwojeń silników indukcyjnych.

### 2.1.1. Metody opisywane w literaturze

W literaturze [1÷9, 17÷23, 25, 34, 37, 40÷42, 45÷49, 56÷73, 75÷82, 84, 89÷96, 105÷108, 112, 114÷128, 130, 138÷141, 145, 147, 148, 153, 154, 158, 159, 164÷173, 179÷189, 194÷197, 199÷210, 235÷238, 243÷248, 251÷269, 275÷290, 293, 295÷305, 309÷313, 315] są opisywane następujące metody:

- ocena na podstawie pomiarów wg norm krajowych, zaleceń branżowych i zakładowych;
- metody prof. Tadeusza Glinki na podstawie pomiarów napięciem stałym;
- wieloparametrowa metoda Wojciecha Wiły;
- metoda na podstawie pomiaru PI, C, SV, DD – test Meggera;
- metoda udarów napięciowych – test Bakera;
- metoda rampy wysokonapięciowej;
- metoda spektroskopii niskoczęstotliwościowej;
- ocena na podstawie pomiarów wyładowań niezupełnych.

### 2.1.2. Ocena na podstawie pomiarów wg norm krajowych, zaleceń branżowych i zakładowych

Spora grupa użytkowników silników indukcyjnych WN w kraju do oceny stanu izolacji tych silników stosuje tylko wskazania norm krajowych i ewentualnie zalecenia branżowe i zakładowe [130, 189, 197, 266]. Pomiar izolacji powinien być poprzedzony pomiarem rezystancji uzwojeń stojana, który jest podstawowym pomiarem w maszynach elektrycznych i transformatorach. Szczegóły i warunki tych pomiarów są omówione w literaturze [76÷79].

Norma [186, 190] nakazuje, aby rezystancje uzwojeń stojana były 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.

Norma [185, 189] określa wymagania w zakresie rezystancji izolacji uzwojeń stojana. Najważniejszym wymaganiem jest konieczność wykonania pomiarów rezystancji izolacji uzwojeń w warunkach określonych normą. Pomiar powinien być wykonany napięciem stałym, przy niezawilgoconych i niezabrudzonych izolatorach, miernikiem izolacji – megaomierzem o napięciu:

$$U = 500 \text{ V dla maszyn o } U_N < 1 \text{ kV,} \quad (1)$$

$U = 1 \text{ kV}$  (wskazane  $U = 2,5 \text{ kV}$ ) dla maszyn o  $U_N \geq 1 \text{ kV}$ . (2)

Pomiar należy wykonać w stosunku do kadłuba silnika i między uzwojenia – mi, kolejno dla każdego niezależnego obwodu elektrycznego. Oznacza to, że pomiar należy wykonać dla każdej fazy oddzielnie lub dla połączonych uzwojeń wszystkich faz, jeżeli punkt zerowy nie jest rozłączalny od kadłuba. Jeżeli punkt zerowy jest rozłączalny, pomiary należy wykonać również pomiędzy fazami. Obwody elektryczne, które nie biorą udziału w pomiarze, należy połączyć z kadłubem.

Pomiary należy wykonać w stanie zimnym maszyny, a następnie w stanie nagrzanym. W warunkach przemysłowych przy badaniach niepełnych pomiary wykonuje się tylko w stanie zimnym [185, 189].

Wymagania co do wartości rezystancji powinien określić wytwórca [185, 189]. Jeżeli takowych nie ma, rezystancja izolacji w  $M\Omega$ , w temperaturze uzwojenia  $t_u$ , mierzona po 60 s od momentu przyłożenia napięcia nie powinna być mniejsza od wartości określonych przez wzory [185, 189]:

$$R_{iz,t} = R_{iz,75} k_t, \quad (3)$$

$$R_{iz,75} = \frac{U_N}{1000 + 10S_N}. \quad (4)$$

gdzie:  $U_N$  – napięcie znamionowe uzwojenia w [V],  $S_N$  – moc znamionowa pozorna maszyny w [MVA],  $k_t$  – współczynnik temperaturowy izolacji (podany np. w normie PN-98/E-04700; tabela 1) [189].

Uwzględnienie temperatury uzwojeń maszyny jest sprawą niezmiernie ważną. Rezystancję należy przeliczyć na daną temperaturę, ponieważ bardzo mocno zależy od temperatury. Współczynnik  $k_t$  ulega zmianie. Przykładowo, dla przedziału temperatur izolacji podczas pomiaru od  $85^\circ\text{C}$  do  $10^\circ\text{C}$ :

$$k_t = 0,7 \quad \text{dla} \quad t_u = 85^\circ\text{C}, \quad (5)$$

$$k_t = 1,0 \quad \text{dla} \quad t_u = 75^\circ\text{C}, \quad (6)$$

$$k_t = 1,0 \quad \text{dla} \quad t_u = 75^\circ\text{C}, \quad (7)$$

W celu wyznaczenia stopnia zawilgocenia uzwojenia maszyny należy mierzyć rezystancję izolacji po upływie 15 i 60 s od momentu przyłożenia napięcia,  $R_{15}$  i  $R_{60}$ . Miarą stopnia zawilgocenia jest stosunek  $R_{60}/R_{15}$  nazywany współczynnikiem absorpcji. Dla maszyn dobrze wysuszonych wg normy [189] powinny być spełnione zależności:

$$\frac{R_{60}}{R_{15}} > \begin{cases} 1,5 \text{ w temperaturze } 20^\circ\text{C}, \\ 1,4 \text{ w temperaturze } 40^\circ\text{C}, \\ 1,3 \text{ w temperaturze } 60^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (8)$$

W literaturze [266] można spotkać również parametr  $DA$  (*dielectric absorption*) definiowany jako  $R_{60}/R_{30}$ , którego wartość

$DA \geq 1,25$  jest nieakceptowalna, a  $DA \geq 1,5$  – akceptowalna. Według wiedzy autorów parametr  $DA$  jest rzadko stosowany w praktyce przemysłowej.

Autorzy podzielają opinię T. Glinki [76÷78], że kryterium (8) jest tylko wskaźnikiem zawilgocenia izolacji i informuje, czy dany silnik należy suszyć przed włączeniem do pracy. 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 (8) 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.

W literaturze [266] można spotkać wskazania odnośnie do wartości  $R_{60}$ . Jest tam stwierdzenie, że wartości  $R_{60}$  izolacji poszczególnych faz maszyny wirującej nie powinny się różnić między sobą więcej niż o 30% i nie powinny się różnić od  $R_{60}$  zmierzonych przy poprzedniej próbie więcej niż o 30%. Częstość pomiarów określają najczęściej instrukcje eksploatacji silników lub zalecenia branżowe lub zakładowe [266]. Mówi się bardzo często o obowiązku wykonania pomiarów w czasie przeglądów silników, ma to miejsce np. co 2 lata.

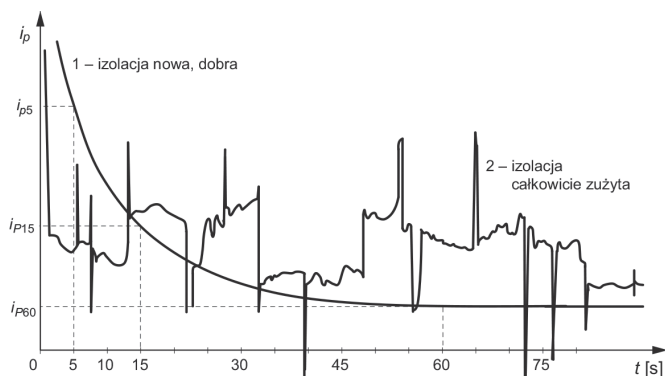
Przedstawione kryteria wydają się być niewystarczające. Mogą one dać jedynie zgrubną ocenę stanu izolacji i poinformować, czy izolacja jest np. zawilgocona. Dla większości silników pracujących w przemyśle są to kryteria dotyczące izolacji głównej. Tylko dla niewielkiej grupy silników (najwyższych mocy), które mają dostępne końce uzwojeń fazowych, pomiary wykonane zgodnie ze wskazaniami normy [189] umożliwiają ocenę izolacji głównej i międzyfazowej.

W niektórych zakładach produkujących i remontujących silniki WN w celu oceny stanu ich izolacji wykonuje się pomiary współczynnika stratności  $\text{tg}\delta$  przy napięciu zmiennym o częstotliwości 50 Hz. Z długoletnich doświadczeń w eksploatacji maszyn elektrycznych wynika, że zjawisku starzenia się izolacji towarzyszy zwiększanie się szczelin powietrznych pomiędzy poszczególnymi warstwami izolacji – tzw. spuchnięcie izolacji. Skutkuje to obniżeniem się wartości napięcia, przy którym pojawiają się wyładowania niezupełne. W pracy [138] podano, że izolacja uzwojeń silnika powinna spełniać warunek:

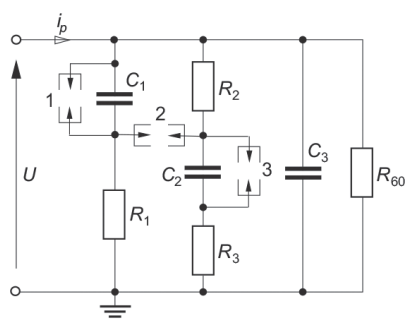
$$\text{tg}\delta_{0,75U_N} - \text{tg}\delta_{0,25U_N} \leq 0,02. \quad (9)$$

Do oceny przebiegu starzenia się izolacji używa się wskaźnika zmian  $\text{tg}\delta$ , czyli różnicy zmian między wartościami  $\text{tg}\delta$  zmierzonymi przy kolejnych pomiarach. Żąda się, aby zmiany nie przekraczały wartości 0,008 [138]. Pomiary  $\text{tg}\delta$  należy w miarę możliwości wykonać dla każdej fazy oddzielnie. Różnice uzyskanych wartości dla poszczególnych faz mogą świadczyć o istnieniu lokalnych uszkodzeń izolacji. Różnice między  $\text{tg}\delta$  dla poszczególnych faz nie powinny być większe niż 0,004 [138].

Zdaniem autorów pomiar  $\text{tg}\delta$  w istotny sposób wzbogaca informacje o stanie izolacji maszyn elektrycznych uzyskane z pomiarów wskazanych w normie [189]. Należy pamiętać [138], że wartości  $\text{tg}\delta$  izolacji można wyznaczyć tylko w przypadku układu o parametrach stałych. Jeżeli izolacja jest na tyle



**Rys. 2.** Przebieg czasowy natężenia prądu upływu  $i_p(t)$  układu izolacyjnego po skokowym załączeniu napięcia stałego: 1 - dla nowej izolacji (zdrowej), 2 - dla izolacji całkowicie zużytej [76÷79]



**Rys. 3.** Schemat zastępczy układu izolacyjnego [76÷79]

zużyta [76 ÷ 78], że w schemacie zastępczym izolacji następuje ciągle zwieranie i rozwieranie pojemności  $C_1$  i  $C_2$  (rys. 3), układ przestaje być układem o stałych parametrach, a kryterium  $\text{tg}\delta$  do oceny stanu izolacji nie powinno być stosowane.

## 2.2. Metody prof. Tadeusza Glinki wykorzystujące pomiary napięciem stałym

W eksploatacji silników indukcyjnych WN oraz 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, diagnozując stan izolacji eksploatowanych w przemyśle krajowym maszyn elektrycznych, prof. Glinka opracował metody oceny stanu izolacji przy wykorzystaniu pomiarów napięciem stałym. Metody przedstawiono w bogatej literaturze [76 ÷ 79]. Metoda oceny izolacji głównej jest już na tyle uznana, że została wpisana do Polskiej Normy PN-E-04700 jako próba nieobowiązkowa [189].

### 2.2.1. Metoda prof. Tadeusza Glinki oceny izolacji głównej

Zachowanie się układu izolacyjnego o dużym stopniu zużycia przy badaniach metodą prądu stałego w sposób zasadniczy różni się od zachowania dobrego układu izolacyjnego. Ilustruje

**Tabela 1.** Kryteria oceny wyników badań izolacji metodą T. Glinki [76÷79]

Lp.	Parametr układu izolacyjnego	Stan techniczny izolacji				
		dobry	dostateczny	niedostateczny		
				izolacja zużyta	izolacja zawilgocona	
1.	Napięcie przebicia $U_p/U_N$	>3	>2	~1,5	≈1	
2.	Rezystancja $R_{60N}$ przy $U_N$	> 10 kW/V	> 3 kW/V	> 3 kW/V	< 1 kW/V	
3a.	Czas zwarcia $t_z$ [s]	dla $U_N = 6$ kV	≥ 30	≈ 10	1	0,1
		dla $U_N < 6$ kV	≥ 10	≈ 5	0,5	0
3b.	Maksymalna wartość napięcia odbudowanego $U_{od\ max}/U_N$	> 0,1	> 0,05	0	0	
3c.	Czas odbudowy napięcia $t_{od}$ [s]	dla $U_N = 6$ kV	> 120	≈ 30	0	0
		dla $U_N < 6$ kV	> 30	≈ 15	0	0
4.	Wahania prądu upływu $\frac{I_{p60max} - I_{p60min}}{I_{p60}}$ przy $U_N$	< 0,5	< 2	> 5	0	
5.	$i_{p15}/i_{p60} = R_{60}/R_{15}$	> 1,5	> 1,2	≈ 1	= 1	

to przykładowo wynik badania przedstawiony na rys. 2, na którym przedstawiono porównanie wyników pomiarów prądu upływu  $i_p$  po skokowym załączeniu napięcia stałego o wartości  $U_0$ . W przypadku nowej izolacji, nieuszkodzonej, natężenie prądu  $i_p$  maleje wykładniczo z upływem czasu do wartości  $U_0/R_{60}$ ,  $U_0/R_{600}$ . Dla izolacji bardzo mocno zużytej natężenie prądu nie ustala się, a charakter jego zmian w funkcji czasu jest stochastyczny, z możliwymi obszarami, w których kierunek prądu zmienia się na przeciwny, co oznacza, że w tych przedziałach czasu prąd płynie od izolacji do źródła zasilania [76÷79]. Autor metody po analizie zjawisk zachodzących w izolacji zużytej zaproponował schemat zastępczy przedstawiony na rys. 3. Jest to schemat inny niż schematy najczęściej spotykane w literaturze [293], które dotyczą nowej izolacji.

Na schemacie z rys. 3  $C_1$  i  $C_2$  to pojemności wewnętrzne izolacji, które przedstawiają rozwarstwienie i popękanie izolacji. W takich miejscach zdarzają się wewnętrzne wyładowania [76÷79]. Odpowiada temu w schemacie zastępczym układu izolacyjnego zwieranie lub rozwieranie pojemności  $C_1$  i  $C_2$  iskiernikami 1, 2 i 3. Przy chwilowym zwarciu iskiernika 2 i rozwartych iskiernikach 1 i 3 prąd upływu  $i_p$  zmienia znak, co odwzorowuje charakter zmian prądu  $i_p$  z rys. 2 dla izolacji całkowicie zużytej [76÷79].  $C_3$  to pojemność powierzchniowa,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  to rezystancje wewnętrzne, a  $R_{60}$  reprezentuje rezystancję zastępczą izolacji zmierzoną prądem stałym po 60 s, czyli w stanie ustalonym [76÷79].

Badanie układu izolacyjnego napięciem stałym metodą prof. Glinki obejmuje następujące próby [76÷79]:

- wyznaczenie charakterystyki  $R_{60} = f(U)$ , o ile to jest możliwe, w przedziale napięcia od 0 do  $2U_N$ ;
- pomiar zmian w czasie prądu upływu  $i_p$  po skokowym załączeniu napięcia stałego o wartości  $U_N$  na całkowicie rozładowany układ izolacyjny;
- naładowanie układu izolacyjnego do napięcia znamionowego, aż do stanu ustalonego, a następnie odłączenie napięcia zasilającego i zwarcie układu izolacyjnego na czas  $t_z$  po czym rozwarcie układu izolacyjnego i pomiar charakterystyki odbudowy napięcia na układzie izolacyjnym  $U_{od}(t)$ .

Pierwsze dwie próby są stosowane w badaniach okresowych izolacji, gdyż są zalecane w instrukcjach eksploatacji maszyn elektrycznych. Jednak zakres tych prób ogranicza się zwykle

do jednej wartości napięcia 2500 V, 1000 V bądź 500 V. W proponowanym programie badań diagnostycznych rozszerza się zakres tych prób na wyznaczenie charakterystyki  $R_{60} = f(U)$ , jeśli jest to możliwe do  $2U_N$  i wyznaczenie  $i_p = f(t)$  przy  $U_N$ .

Próba trzecia jest próbą pomysłu prof. Glinki i jest najważniejszą dla diagnostyki stanu technicznego izolacji i oceny stopnia jej zużycia [76÷79].

T. Glinka w swoich publikacjach [76÷79] bardzo dokładnie opisał układ pomiarowy oraz technikę pomiarów, którą należy stosować przy proponowanej metodzie diagnozowania izolacji maszyn elektrycznych.

Opierając się na przeprowadzonych pomiarach, wyznacza się następujące charakterystyki i parametry układu izolacyjnego:

- wykres rezystancji izolacji  $R_{60} = f(U)$  w zakresie napięcia od 0 do  $2U_N$ , z którego wyznacza się rezystancję  $R_{60}$  dla  $U_N$ ;
- szacuje się wartość spodziewanego napięcia przebicia układu izolacyjnego  $U_p$ , ekstrapolując krzywą  $R_{60} = f(U)$ ;
- wykres odbudowy napięcia  $U_{od}(t)$  na układzie izolacyjnym, z którego wyznacza się czas odbudowy  $t_{od}$  i wartość maksymalną odbudowy napięcia  $U_{od\ max}$ ;
- współczynnik absorpcji układu izolacyjnego  $i_{p15}/i_{p60}$ ,  $R_{60}/R_{15}$ ;
- poziom wahań prądu upływu  $I_{p60max}$  i  $I_{p60min}$  liczony po czasie  $t = 60$  s od chwili załączenia napięcia.

Wyznaczone charakterystyki i parametry określają stan techniczny izolacji. W publikacjach poświęconych temu zagadnieniu, np. [76÷79], podano kryteria oceny stanu izolacji na podstawie wymienionych charakterystyk i parametrów – tabela 1.

Podanym w tabeli ocenom stanu technicznego izolacji prof. Glinka przypisał również ocenę punktową stopnia zużycia, od 5 do 0 punktów. Jest ona następująca:

- 5 – izolacja bardzo dobra (nowa);
- 4 – izolacja dobra (ma obniżone parametry odbudowy napięcia i rezystancji);
- 3 – izolacja dostateczna (małe wartości odbudowy napięcia, co oznacza znaczny stopień jej zużycia lub zabrudzenie);
- 2 – izolacja mniej niż dostateczna (napięcie nie odbudowuje się po czasie zwarcia 1 s, stopień zabrudzenia jest duży);
- 1 – izolacja niedostateczna, w czasie pracy maszyny występuje realne zagrożenie doziemienia uzwojenia;
- 0 – trwałe uszkodzenie izolacji (doziemienia, zwarcia zwojowe), stan awaryjny, zużycie 100%.

Autor metody [76÷79], opierając się na własnym doświadczeniu, określa częstość badań silników napięciem stałym. I tak, powinny one być wykonywane;

- co 5 lat dla silników o dobrym stanie izolacji;
- co 2 lata dla silników o pogorszonym stanie izolacji;
- co 1 rok dla silników o pogorszonym stanie izolacji i pracujących w odpowiedzialnych układach napędowych.

Na podstawie swojego doświadczenia co do eksploatacji prognozuje, że maszyny elektryczne z izolacją ocenianą na 5, 4 i 3 będą pracować niezawodnie co najmniej tyle lat, ile wynosi ocena punktowa.

Metoda T. Glinki w krajowych zakładach przemysłowych jest bardzo często stosowana jako wielokryterialna metoda prądu stałego (WMPS) – rys. 4–6. Przykładem może być Elektrownia

Opole, gdzie od 1992 roku prowadzone są systematyczne pomiary stanu izolacji maszyn elektrycznych napięciem stałym. Wyniki tych prac są zebrane w [147, 148].

Wykorzystując zależność  $R_{60} = f(t)$  i przebiegi czasowe  $I_p = f(t)$ ,  $U_{odb} = f(t)$ , opracowano empiryczny, syntetyczny współczynnik kondycji izolacji DFŁ (Patent nr 203761) opisany wzorem:

$$DF\dot{L} = \frac{I_{pu} U_n}{t_{od} \frac{U_p}{U_n}} \left[ \frac{\mu AV}{s} \right], \quad (10)$$

Maszyna o dobrym stanie izolacji powinna spełniać warunek [148, 149]:

$$DF\dot{L} < DF\dot{L}_{WZ}. \quad (11)$$

Wzorcowy wskaźnik izolacji należy wyznaczać na podstawie pomiarów nowej maszyny, wysuszonej, przed jej oddaniem do eksploatacji. Granice wartości liczbowych współczynnika DFŁ są różne dla różnych rodzajów maszyn elektrycznych i różnych poziomów napięć pracy.

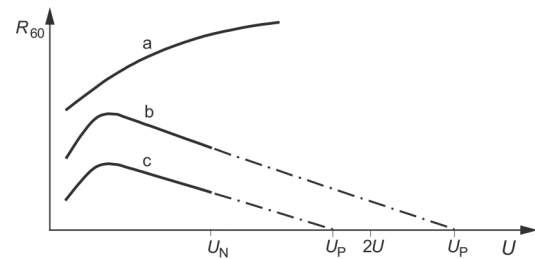
### 2.3. Metoda prof. Tadeusza Glinki i zespołu do oceny izolacji zwojowej

W 2009 roku w pracy doktorskiej pt. „Badania diagnostyczne stopnia zużycia izolacji głównej i zwojowej w maszynach elektrycznych” autorstwa Adama Decnera przedstawiono nowe zastosowanie metody prądu stałego do oceny diagnostycznej izolacji zwojowej [45÷49]. Metoda polega na badaniu przebiegu napięcia na uzwojeniu po przerwaniu prądu stałego płynącego w uzwojeniu. Metoda w ocenie jej twórców dobrze się sprawdza jako metoda porównawcza jakości izolacji zwojowej w poszczególnych fazach uzwojenia maszyny 3-fazowej. Twórcy przeprowadzili badania zarówno na pojedynczych cewkach maszyn elektrycznych o różnym stopniu zużycia izolacji, jak i na uzwojeniach zabudowanych w maszynach. Symulacje komputerowe i badania eksperymentalne wykazały, że po przerwaniu prądu stałego płynącego w uzwojeniu [45÷49]:

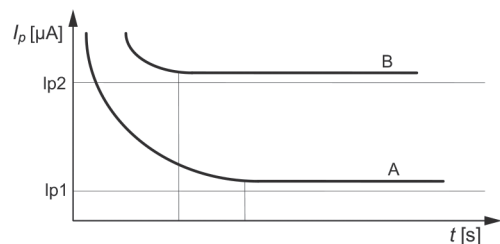
- fala napięciowa generowana w uzwojeniu indukuje się w każdym zezwoju, a więc rozkłada się równomiernie na zezwojach;
- częstotliwość oscylacji zależy wyłącznie od indukcyjności uzwojenia  $L_{Cu}$  i pojemności układu izolacyjnego  $C_{iz}$ , a współczynnik tłumienia – od rezystancji uzwojenia i rezystancji izolacji zwojowej  $R_{Cu}$ ,  $R_{iz}$ .

Proponowany przez autorów metody sposób pomiaru jest następujący:

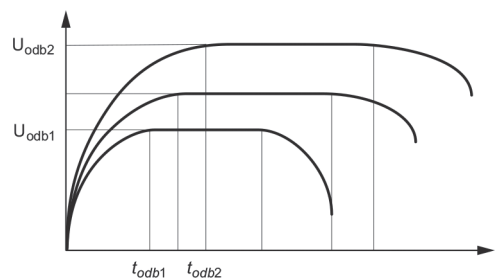
- Mając dostęp do końcówek uzwojenia każdej fazy należy wymusić przepływ prądu stałego w danej fazie na poziomie kilku procent prądu znamionowego badanej maszyny (np. 5%). Prąd ten jest bezpieczny dla układu izolacyjnego maszyny. Ponadto jest możliwe wymuszenie zawsze tej samej wartości prądu dla kolejnych badań.
- Kryterium oceny jest częstotliwość napięcia indukowanego i obwiednia przebiegu napięcia po przerwaniu prądu probierczego. Różnice w częstotliwości, już na poziomie 5%, i zmiana kształtu obwiedni dla faz uzwojenia świadczą o pogorszeniu się izolacji zwojowej uzwojenia [45÷49].



Rys. 4. Charakterystyka rezystancji izolacji  $R_{60} = f(U)$ : a – niewyznaczalne hipotetyczne napięcie przebicia, b – napięcie przebicia  $U_p > 2U_N$ , c – napięcie przebicia  $U_p < 2U_N$  [147, 148]



Rys. 5. Uogólniony obszar przebiegów czasowych  $I_p(t)$  w układzie izolacyjnym silników [147, 148]

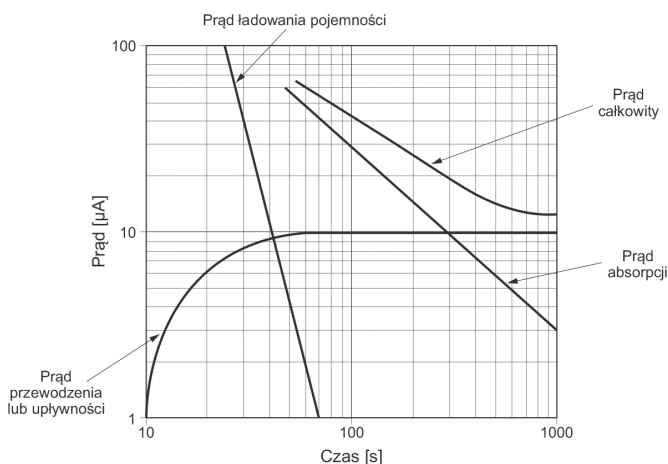


Rys. 6. Uogólniony obszar charakterystyk  $U_{odb} = f(t)$  [147, 148]

### 3. Metoda na podstawie pomiarów PI, C, SV, DD – test Meggera

Oceniając stan izolacji maszyn elektrycznych na podstawie wartości  $R_{15}$ ,  $R_{60}$ , a w ogólności na podstawie pomiarów rezystancji wykonanych w krótkim odstępie czasu, zauważono [130, 153, 154], że ze względu na charakter zmian prądu w czasie pomiaru można popełnić duże błędy. Charakter zmian prądu w izolacji podczas pomiaru stanu izolacji silnika prądem stałym przedstawiono na rys. 7. W szczególności pomiar  $R_{15}$  ma miejsce na stromym odcinku charakterystyki  $i(t)$ , co może skutkować błędami w pomiarze [130, 153, 154]. Powstał pomysł pomiarów stanu izolacji na podstawie pomiarów w długim przedziale czasu. W firmach Megger, Fluke, Adwel, Vanquard Instruments Company oraz AEMC Instruments [130, 153, 154, 266] opracowano aparaturę i metodę do oceny stanu izolacji maszyn elektrycznych, w tym silników WN na podstawie pomiarów wykonanych w przedziale 10–30 minut i dłuższym.

Metoda nazywana testem Meggera (od nazwy firmy Megger) opiera się na pomiarze [130, 153, 154]:



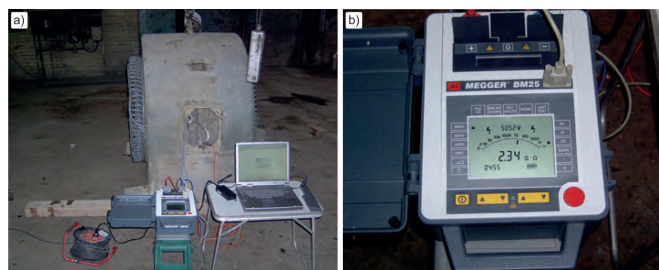
Rys. 7. Prąd w izolacji podczas pomiaru jej stanu [130, 153, 154]

- (a) wskaźnika polaryzacji PI (*Polarization Index*):  $PI = R_{10\ min} / R_1$ , czyli  $R$  zmierzone po 10 minutach do  $R$  zmierzonego po 1 minucie od podania napięcia pomiarowego (dla stojana silnika indukcyjnego WN zalecane jest  $U = 5\ kV$ );
- (b) pojemności układu izolacji  $C$ ;
- (c) pomiary rozładowania dielektryka DD (*Dielectric Discharge*).

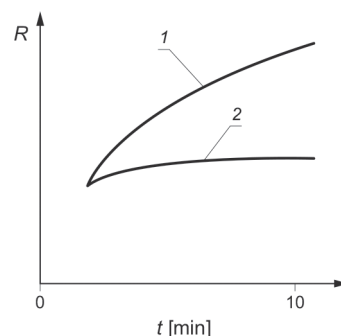
Na rysunku 8 przedstawiono zdjęcie z testu Meggera wykonywanego na przykładowym silniku w cementowni „ODRA” S.A.

W czasie pomiarów stanu izolacji stwierdzono doświadczalnie, że w maszynie elektrycznej, która ma dobrą izolację, wzrost rezystancji izolacji ma miejsce w długim przedziale czasu, natomiast dla maszyny, która ma izolację zawilgoconą lub zabrudzoną, wartość rezystancji ustala się bardzo szybko – krzywa  $R$  w funkcji czasu jest płaska (w ciągu 10 minut, co zilustrowano na rys. 9). Pomiar izolacji w dłuższym przedziale czasu stał się w pomiarach diagnostycznych izolacji standardem. Wszystkie mierniki do oceny stanu izolacji renomowanych firm produkujących sprzęt diagnostyczny są przystosowane do takich pomiarów, producenci sprzętu nawet nie przewidują w opcji podstawowej pomiaru  $R_{60} / R_{15}$ .

Obecność trzech składowych prądu podczas pomiarów stanu izolacji – prądu ładowania pojemności, prądu absorpcji i prądu upływu – powoduje, że pomiar prądu polaryzacji jest trudny. W fazie rozładowania pomiar ten jest znacznie prostszy. Podczas pomiaru parametru DD pojemność izolacji jest ładowana przez długi czas – zalecane 30 min. Po tak długim czasie proces ładowania i polaryzacji jest zakończony. W izolacji płynie tylko prąd upływu. Następnie izolacja jest rozładowywana. Prąd jest mierzony po upływie 1 min, aby wyeliminować składową rozładowania pojemności. Oprócz prądu mierzona jest pojemność  $C$  badanego układu izolacji i napięcie pomiarowe, probiercze,



Rys. 8. Zdjęcie układu pomiarowego do testu Meggera wykonywanego na przykładowym silniku w cementowni „ODRA” S.A.: a) pomiar na silniku, b) widok miernika Meggera



Rys. 9. Zmiany rezystancji izolacji w funkcji czasu próby: krzywa 1 – dla silnika z izolacją dobrą, krzywa 2 – dla silnika z izolacją wadliwą [130, 153, 154]

Tabela 2. Wielkości określające stan izolacji silników [153]

Stan izolacji	PI	$R_{60} / R_{15}$	DD
Słaby	< 1	< 1	> 4
Niejasny	1 ÷ 2	1 ÷ 1,4	2 ÷ 4
Dobry	2 ÷ 4	1,4 ÷ 1,6	< 2

$U$  cyklu ładowania. Wartość wskaźnika DD jest obliczona ze wzoru

$$DD = \frac{I_{1\ min}}{U \cdot C} \left[ \frac{mA}{V \cdot F} \right]. \quad (12)$$

Wskaźnik DD jest zależny od temperatury [130, 153, 154]. Porównania wartości DD należy przeprowadzać dla zbliżonych warunków termicznych. W tabeli 2 przedstawiono omawiane wielkości określające stan izolacji silników WN. Wskaźnik DD dla złego stanu izolacji przyjmuje wartości większe od 7.

Na rysunku 10 przedstawiono charakter zmian prądu w izolacji podczas rozładowania dielektryka. Pomiar wskaźnika

reklama

reklama

DD jest szczególnie przydatny przy pomiarach stanu izolacji maszyn elektrycznych WN mających izolację wielowarstwową [130, 153, 154]. Ten typ izolacji jest obecnie dominujący.

### 3.1. Badanie napięciem narastającym schodkowo – SV (Step Voltage)

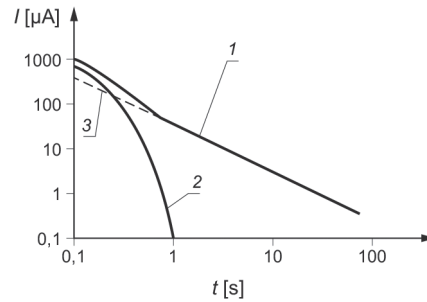
Idealna izolacja ma jednakową rezystancję niezależnie od napięcia probierczego [130, 153, 154]. Izolacja zużyta, izolacja z wadami, ma rezystancję wyraźnie zmniejszającą się przy wyższych napięciach. Zilustrowano to na rys. 11 i 12. Na rysunku 11 jest pokazana zależność rezystancji od napięcia probierczego dla izolacji dobrej, natomiast na rys. 12 – przypadek tej samej izolacji po częściowym jej zużyciu. Technicznie ten rodzaj pomiaru jest wykonywany przy napięciu narastającym schodkowo – SV. Przykładowo, przy użyciu miernika firmy Megger BM 25 pomiar rezystancji wykonuje się w czasie 5 min. Napięcie probiercze w czasie pomiaru wzrasta o 1 kV co 1 min. Aparatura diagnostyczna czołowych, światowych firm produkujących aparaturę do oceny stanu izolacji maszyn elektrycznych umożliwia pomiary wielkości wymienionych w punktach (a)÷(c) [130, 153, 154].

### 3.2. Metoda udarów napięciowych, test Bakera

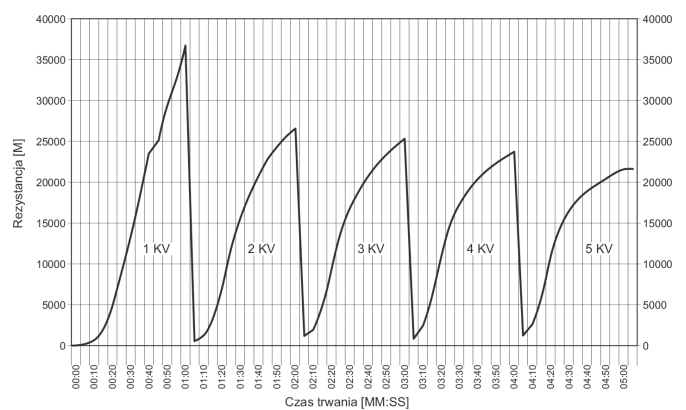
Uszkodzenia izolacji uzwojenia lub zwarcie w uzwojeniu powodują zmianę pojemności  $C_b$  i indukcyjności  $L$ , a tym samym częstotliwości oscylacji  $f$  [232, 304, 305]. Przykładowe wyniki pomiarów charakterystyk napięciowo-czasowych przykładowych uzwojeń pokazano na rys. 9.13÷9.15. W pamięci urządzenia pomiarowego przechowuje się przebiegi referencyjne uzyskane dla uzwojeń wzorcowych – wyniki pomiarów uzyskane przy odbiorze silnika dla nowej izolacji. W celu oceny stanu izolacji przeprowadza się porównania wyników otrzymanych na bieżąco z wynikami wcześniejszymi. Porównuje się również między sobą tłumione oscylacyjne przebiegi napięcia na badanych uzwojeniach silnika (na poszczególnych uzwojeniach fazowych) i porównuje się wyniki dla badań międzyfazowych. Określa się różnice pomiędzy wynikami. Obliczenia wykonuje komputer i podaje różnice w procentach. Zmieniający się kształt napięcia jest charakterystyczny przy osłabieniu izolacji zwojowej. Przebiegi czasowe odpowiedzi dla takich uzwojeń „przesuwają” się w lewo. Duża asymetria indukcyjności może również być skutkiem błędnego połączenia cewek uzwojenia w czasie montażu.

Najnowsze testery izolacji firmy SKF BAKER (obecnie Megger) trudno nazywać testerami impulsowymi. Producent wyposażył je w panel pomiaru małych rezystancji (do pomiaru rezystancji uzwojeń) oraz w panel do pomiaru najważniejszych wielkości z testu Meggera (do oceny izolacji głównej). Oczywiście oprócz tych paneli znajduje się panel do badań impulsowych na coraz to wyższe napięcia i na coraz to większe moce. Do obsługi testerów dedykowane jest specjalistyczne oprogramowanie, umożliwiające również archiwizację wyników pomiarów.

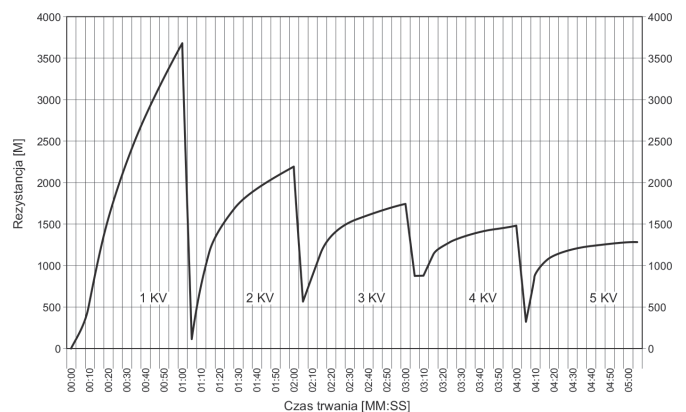
Metoda udarów napięciowych jest coraz częściej stosowana do diagnostyki stanu izolacji silników. Zdjęcia z pomiarów diagnostycznych izolacji uzwojeń przyrządem SKF BAKER



Rys. 10. Prąd płynący w izolacji podczas rozładowania dielektryka: 1 – prąd całkowity, 2 – prąd pojemnościowy, 3 – prąd reabsorpcji [130, 153, 154]



Rys. 11. Zmiany rezystancji izolacji w funkcji napięcia probierczego – izolacja w dobrym stanie technicznym, pomiar metodą SV



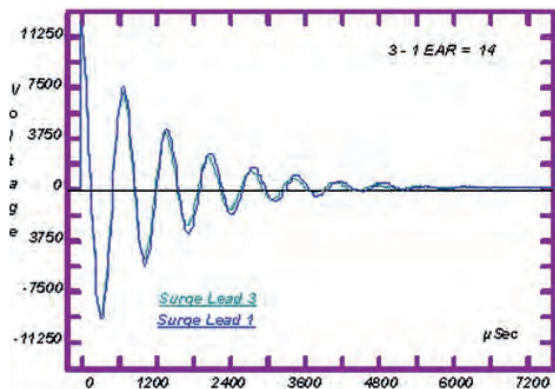
Rys. 12. Zmiany rezystancji izolacji w funkcji napięcia probierczego – izolacja częściowo zużyta, pomiar metodą SV

przykładowego silnika w cementowni „ODRA” S.A. przedstawiono na rys. 16.

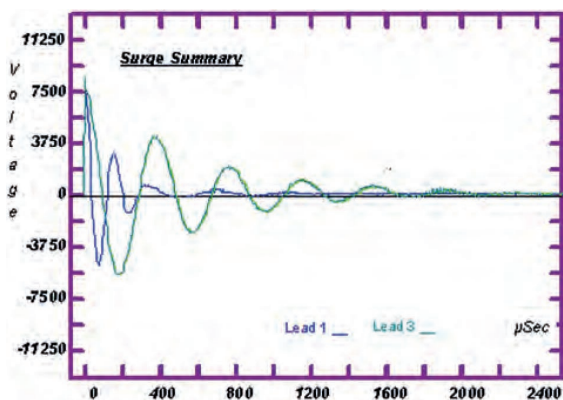
### 3.3. Ocena stanu izolacji na podstawie pomiarów wyładowań niezupełnych

Złożona struktura materiałów izolacyjnych stosowanych w silnikach indukcyjnych WN i specyfika procesu technologicznego

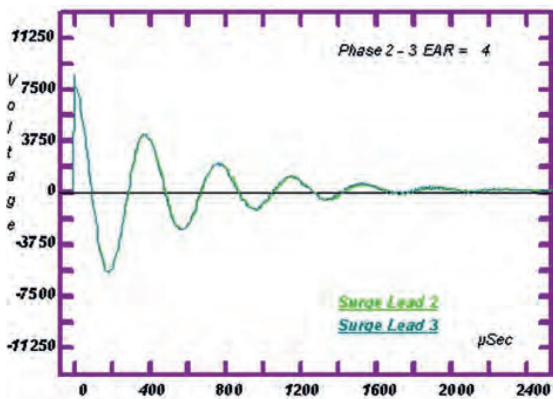




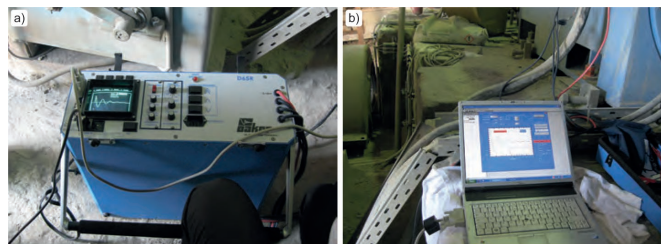
Rys. 13. Charakterystyka napięciowo-czasowa uzwojenia silnika z osłabioną izolacją zwojową [232]: Voltage - napięcie, µSec - mikrosekundy, 3 - 1 EAR = 14 - 3 i 1 różnica = 14%, Surge Lead 3 - oscylacja dla cewki 3, Surge Lead 1 - oscylacja dla cewki 1



Rys. 14. Charakterystyka napięciowo-czasowa błędnie połączonego uzwojenia silnika [232]: Voltage - napięcie, µSec - mikrosekundy, 3 - 1 EAR = 14 - 3 i 1 różnica = 14%, Surge Summary - oscylacja dla wszystkich cewek, Lead 1 - cewka 1, Lead 2 - cewka 2, Lead 3 - cewka 3



Rys. 15. Charakterystyka napięciowo-czasowa uzwojenia z dobrą izolacją zwojową [232]: Voltage - napięcie, µSec - mikrosekundy, Phase 2 - 3 EAR = 4 - uzwojenie fazowe 2 i 3 różnica = 4%, Surge Lead 2 - oscylacja dla cewki 2, Surge Lead 3 - oscylacja dla cewki 3



Rys. 16. Zdjęcie z testu BAKERA wykonywanego na przykładowym silniku w cementowni „ODRA” S.A.: a) pomiar na silniku, b) widok na komputer pomiarowy

ich układu izolacyjnego mogą być przyczynami powstania wewnętrznych defektów – najczęściej w postaci: wtrącin powietrznych, obszarów o zmiennej przenikalności dielektrycznej, ostrych mikronierówności powierzchniowych itp. [1÷9, 17÷23, 25, 33, 34, 37, 40÷42, 45÷49, 57÷73, 75÷82, 84, 88÷97, 105÷109, 112, 113, 115÷129, 131, 140÷142, 145, 148, 149, 154, 155, 159, 160, 162, 163, 165÷174, 180÷190, 193, 195÷198, 200÷211, 233, 236÷239, 244÷249, 250÷270, 275÷291, 293, 296÷306, 309÷314, 315].

Jak już wspomniano, układy izolacyjne silników WN pracują w warunkach wieloczynnikowego narażenia, co powoduje, że w czasie eksploatacji maszyn powiększają się defekty już istniejące oraz powstają nowe. Procesowi starzenia się izolacji towarzyszy zjawisko wyładowań niezupełnych – *wnz* (ang. *Partial Discharge* – PD). Wyładowania niezupełne są wyładowaniami występującymi wewnątrz zaizolowanego układu, który tylko częściowo zwiera izolację między przewodnikami, a izolacje te mogą przylegać do przewodnika lub do niego nie przylegać [84]. Są one ogólnie uważane za wyładowania lokalne w izolacji i w wielu przypadkach ze znacznym wyprzedzeniem poprzedzają całkowite przebicie izolacji [1÷9, 17÷23, 25, 33, 34, 37, 40÷42, 45÷49, 57÷73, 75÷82, 84, 88÷97, 105÷109, 112, 113, 115÷129, 131, 140÷142, 145, 148, 149, 154, 155, 159, 160, 162, 163, 165÷174, 180÷190, 193, 195÷198, 200÷211, 233, 236÷239, 244÷270, 275÷291, 293, 296÷306, 309÷314, 315]. W ogólności *wnz* stanowią skutek miejscowej koncentracji napiężeń w izolacji lub na jej powierzchni. Mają zwykle postać impulsów o czasie trwania krótszym od 1 ms [84]. Jeżeli lokalne pole elektryczne przekroczy określoną granicę inicjacji wyładowania (np. dla powietrza  $E = 3 \text{ kV/mm}$  [1÷9, 17÷23, 25, 33, 34, 37, 40÷42, 45÷49, 57÷73, 75÷82, 84, 88÷97, 105÷109, 112, 113, 115÷129, 131, 140÷142, 145, 148, 149, 154, 155, 159, 160, 162, 163, 165÷174, 180÷190, 193, 195÷198, 200÷211, 233, 236÷239, 244÷270, 275÷291, 293, 296÷306, 309÷314, 315]), to w obecności elektronu startowego formuje się lawina elektronów. Zjawisko to jest ograniczone w przestrzeni i ma charakter przejściowy [84]. Skutkiem występowania tego typu zjawisk w układzie jest stopniowe osłabienie izolacji, w szczególności w wyniku kumulowania się uszkodzeń przy niegasnących *wnz* [84]. Jest to jedna z przyczyn starzenia eksploatacyjnego izolacji. Jak wynika z badań [84], *wnz* są głównym objawem uszkodzenia izolacji wywołanego jej zestarzeniem. Z tego powodu detekcja *wnz* izolacji jest ważnym elementem oceny jej stanu

[84]. Energia elektronów w *wnz* może osiągać poziom 10–20 eV (energia jonizacji) [84]. Zależnie od rodzaju wiązań w materiale izolacyjnym energia ta może powodować przerwanie wiązań chemicznych (np. w polimerach przerwanie następują powyżej 5 eV). Skutkiem tego jest prosta ablacja lub erozja materiału narażonego na *wnz*, zmiana jego właściwości i struktury chemicznej, a w końcowym etapie nawet zwęglenie [84]. Zagadnienie to jest przedstawione w literaturze [1÷9, 17÷23, 25, 33, 34, 37, 40÷42, 45÷49, 57÷73, 75÷82, 84, 88÷97, 105÷109, 112, 113, 115÷129, 131, 140÷142, 145, 148, 149, 154, 155, 159, 160, 162, 163, 165÷174, 180÷190, 193, 195÷198, 200÷211, 233, 236÷239, 244÷249, 250÷270, 275÷291, 293, 296÷306, 309÷314, 315].

Na izolację uzwojeń maszyn elektrycznych dobiera się materiały, które cechuje duża odporność na *wnz*. Materiałem takim jest np. mika. Jak wykazują badania [84], maszyny elektryczne, w tym silniki WN, mające izolację na bazie miki, mogą pracować przy ładunku *wnz* rzędu tysięcy pC.

Pomimo swej lokalnej natury *wnz* są zjawiskiem niezwykle złożonym, wykazują zachowania chaotyczne, niestacjonarne [84]. Złożoność tego zjawiska wynika z dużej liczby i różnorodności warunków geometrycznych i materiałowych, w których *wnz* mogą zaistnieć.

W ostatnich kilku latach obserwuje się coraz częściej wykorzystywanie *wnz* do diagnostyki stanu izolacji maszyn elektrycznych WN, głównie dzięki szybkiemu rozwojowi techniki cyfrowej, która umożliwia przetwarzanie i analizę informacji z pomiarów *wnz* [1÷9, 17÷23, 25, 33, 34, 37, 40÷42, 45÷49, 57÷73, 75÷82, 84, 88÷97, 105÷109, 112, 113, 115÷129, 131, 140÷142, 145, 148, 149, 154, 155, 159, 160, 162, 163, 165÷174, 180÷190, 193, 195÷198, 200÷211, 233, 236÷239, 244÷249, 250÷270, 275÷291, 293, 296÷306, 309÷314, 315]. Zagadnienie wykorzystania *wnz* do diagnostyki stanu izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych off-line jest przedstawione w literaturze [1÷9, 17÷23, 25, 33, 34, 37, 40÷42, 45÷49, 57÷73, 75÷82, 84, 88÷97, 105÷109, 112, 113, 115÷129, 131, 140÷142, 145, 148, 149, 154, 155, 159, 160, 162, 163, 165÷174, 180÷190, 193, 195÷198, 200÷211, 233, 236÷239, 244÷249, 250÷270, 275÷291, 293, 296÷306, 309÷314, 315]. ■

Artykuł pochodzi z książki:

„Utrzymanie ruchu w przemyśle”, S.Szymaniec, M.Kacperak.  
Wydawnictwo Naukowe PWN, 2020