

# Wykorzystanie napięcia stałego do badań izolacji głównej maszyn elektrycznych dużej mocy

Piotr Zientek, Waleria Łukaszewicz-Szmytka, Grzegorz Czempik

## 1. Wstęp

Wykorzystywanie maszyn elektrycznych w układach napędowych pociąga za sobą konieczność przeprowadzania pomiarów diagnostycznych oraz okresowych przeglądów. Ma to na celu wykrycie wad mających bezpośredni wpływ na czas eksploatacji maszyny oraz zapewnienie bezawaryjnej pracy. W przypadku wykrycia wad powinniśmy podjąć odpowiednie kroki w celu ich usunięcia lub zminimalizowania wpływu na dalszą pracę maszyny. Im większa moc maszyny, tym koszty związane z przypadkową awarią mogą być większe. W przypadku generatorów synchronicznych, które należą do podstawowych elementów układu blokowego elektrowni, straty wynikające z ewentualnej awarii mogą być ogromne, często porównywalne z zakupem nowej maszyny. Aby im zapobiegać oraz zminimalizować ich skutki, w okresach przeglądów i remontów maszyn elektrycznych przeprowadza się badania diagnostyczne układu izolacyjnego uzwojeń, który jest jednym z kluczowych elementów niezawodności pracy tych maszyn. Skrupulatne wykonywanie badań diagnostycznych w określonych odstępach czasowych pozwala oszacować stopień degradacji izolacji uzwojeń oraz określić i ocenić długość bezawaryjnej pracy. Działania w tym zakresie zapobiegają wydatkom związanym z kosztowną awarią maszyn elektrycznych, postojem układu napędowego oraz innym przypadkom będącym rezultatem niebezpiecznych uszkodzeń izolacji.

Układy izolacyjne uzwojeń maszyn elektrycznych pracują w bardzo trudnych warunkach. Narażone są na działanie wysokich temperatur, sił mechanicznych oraz pola elektromagnetycznego. Niezawodność ich pracy jest zatem uzależniona od procesów degradacji układu izolacyjnego, jakim podlega on w czasie eksploatacji. Na procesy te mają wpływ:

- przebieg eksploatacji i warunki pracy maszyny, m.in. stopień obciążenia, przeciążenia;
- parametry konstrukcyjne maszyn i rodzaje użytych materiałów;
- warunki środowiskowe, w jakich pracują maszyny, do których zaliczamy: temperaturę, wilgotność, zabrudzenia (pyły, pary olejów);
- wartość napięcia zasilania;
- przepięcia w napięciu zasilającym;
- częstotliwość i zakres wykonywanych prac remontowych.

Należy tutaj zaznaczyć, że uszkodzenia układów izolacyjnych najczęściej występują w maszynach wysokonapięciowych. W przypadku maszyn niskonapięciowych problem ten praktycznie nie występuje. Z tego względu badania układów

**Streszczenie:** Diagnostyka układu izolacyjnego uzwojeń maszyn elektrycznych napięciem stałym jest najprostszą metodą oceny stanu technicznego izolacji. Prostota pomiaru tą metodą, małe gabaryty sprzętu pomiarowego oraz szybkość otrzymania wyników sprawiają, że metody wykorzystujące napięcie stałe są powszechnie stosowane do ogólnej, a nawet zaawansowanej oceny stopnia zużycia izolacji. Wyznaczone parametry elektryczne układu izolacyjnego są parametrami kryterialnymi, według których można w sposób jednoznaczny ocenić stan techniczny izolacji uzwojenia.

Słowa kluczowe: maszyny elektryczne, diagnostyka i remonty maszyn, pomiar izolacji

## APPLICATION OF DC VOLTAGE IN INSULATION TO GROUND TESTS FOR HIGH POWER ELECTRICAL MACHINES

**Abstract:** DC voltage diagnostics of insulation system of electrical machines is the most straightforward method of assessing technical condition of insulation.. The simplicity of DC voltage tests, small dimensions of measurement apparatus and rapid conclusions result in the fact, that these methods are universally used in general and even advanced evaluation of insulation's degree of wear. Electrical parameters of insulation system determined with DC voltage are criteria parameters. Technical condition of winding insulation may be unambiguously assessed with the help of these parameters.

Keywords: electrical machines, machine diagnostics and repairs, insulation measurement

izolacyjnych prowadzi się głównie w maszynach wysokiego napięcia [3].

Mają one charakter teoretyczny oraz laboratoryjny, a najczęściej zmierzają do określenia wskaźników diagnostycznych opisujących stopień zużycia izolacji [2, 4, 5, 6, 10, 11, 14]. Działania te stanowią podstawowe cele prac w dziedzinie diagnostyki wysokonapięciowej.

## 2. Rodzaje metod diagnostycznych

Do badania izolacji głównej maszyn elektrycznych wykorzystuje się wiele metod diagnostycznych. Metody te pozwalają określać stan techniczny oraz śledzić proces starzenia się układu

reklama

izolacyjnego uzwojeń. Istnieją metody oparte na pomiarach napięciem stałym i napięciem przemiennym. Do badań diagnostycznych wykorzystujących napięcie stałe zaliczamy:

- pomiar rezystancji izolacji IR;
- wyznaczenie wskaźnika polaryzacji PI;
- wyznaczenie wskaźnika absorpcji dielektrycznej DAR;
- wyznaczenie wskaźnika rozładowania dielektryka DD;
- pomiar napięciem narastającym schodkowo SV;
- wielokryterialna metoda prądu stałego [6].

Do badań diagnostycznych wykorzystujących napięcie przemiennie zaliczamy:

- pomiar współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$  oraz pojemności uzwojeń;
- pomiar poziomu wyładowań niezupełnych.

Metody tych badań są powszechnie znane i w zależności od konieczności stosowane w praktyce. Do wykonania tych badań konieczny jest odpowiedni specjalistyczny sprzęt pomiarowy.

### 3. Rodzaj sprzętu pomiarowego wykorzystywanego w badaniach

Do badań izolacji głównej napięciem stałym wykorzystuje się wysokonapięciowe mierniki rezystancji izolacji o różnych zakresach napięć pomiarowych. Wartość wykorzystywanego napięcia pomiarowego uzależniona jest od napięcia znamionowego badanej maszyny. Do przyrządów tych zaliczamy m.in.:

- Mera Tronik P435 (10 kV);
- Sonel MIC-10k1 (10 kV), (rys. 1 a);
- Megger S1-1052 (10 kV), (rys. 1 b);
- Kyoritsu KEW 3128 (12 kV), (rys. 1 c);
- Metrel MI 3200 TeraOhm (10 kV).

Wszystkie te przyrządy – oprócz P435 – umożliwiają przeprowadzenie badań rezystancji izolacji maszyn elektrycznych dużej mocy w szerokim zakresie napięć, z automatycznym wyliczaniem najważniejszych i charakterystycznych wskaźników jakości izolacji, takich jak PI, DAR i DD. Dodatkowo możliwy jest zapis wyników pomiaru do wewnętrznej pamięci w postaci cyfrowej i graficznej w celu późniejszego ich wykorzystania.

### 4. Metody pomiarowe wykorzystujące napięcie stałe

Prostota pomiaru napięciem stałym, małe gabaryty sprzętu pomiarowego oraz szybkość otrzymania wyników sprawiają, że metody te są powszechnie stosowane do ogólnej, a nawet zaawansowanej oceny stopnia zużycia izolacji [1, 6, 7, 8, 12, 16, 17, 18]. Zaletą tych metod jest również duża odporność na zakłócenia zewnętrzne [6].

Badanie rezystancji izolacji opiera się na pomiarze natężenia prądu płynącego przez izolację pod wpływem przyłożonego napięcia stałego. Pomiar wykonuje się przy stałej wartości napięcia. Znając wartość napięcia i przepływającego prądu, rezystancję izolacji wyznaczamy z prawa Ohma:

$$R = \frac{U}{I} \quad (1)$$

gdzie:

$U$  – napięcie stałe przyłożone do układu izolacyjnego;

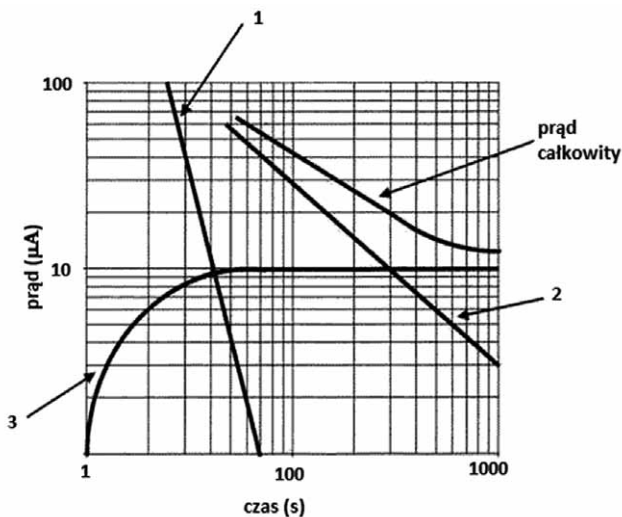
$I$  – prąd płynący przez izolację.



Rys. 1. Wysokonapięciowe mierniki rezystancji izolacji:  
a) Sonel MIC-10k1; b) Megger S1-1052; c) Kyoritsu KEW 3128

Całkowity prąd płynący przez układ izolacyjny jest sumą trzech prądów [13], (rys. 2):

- prądu absorpcji – początkowo duży, maleje dużo wolniej niż prąd pojemności, co wynika z natury zjawisk fizycznych zachodzących w materiale izolacyjnym;
- prądu pojemności – jest prądem ładowania izolacji i zależy od pojemności  $C$  badanego obiektu, początkowo duży, obniża się wraz z ładowaniem pojemności;
- prądu upływności – prąd o niewielkiej ustalonej wartości, składający się z dwóch składowych:
  - prądu płynącego przez układ izolacyjny, tzw. upływność skrośna, która zależy od rodzaju użytego materiału izolacyjnego,
  - prądu płynącego po powierzchni układu, tzw. upływność powierzchniowa, zależna od czystości materiału izolacyjnego.



Rys. 2. Prądy płynące przez układ izolacyjny [13]:

1 - prąd pojemności; 2 - prąd absorpcji; 3 - prąd upływności

#### 4.1. Pomiar rezystancji izolacji IR

Najczęściej wykonywanym pomiarem wykorzystującym napięcie stałe jest pomiar rezystancji izolacji. Jest to pomiar bardzo łatwy do wykonania, umożliwiający zobrazowanie w szybki i prosty sposób ogólnego stanu układu izolacyjnego uzwojeń. Jest to podstawowy pomiar, jaki należy wykonać przed

Tabela 1. Wartości napięć probierczych w pomiarze stanu izolacji wysokonapięciowych maszyn elektrycznych [9]

Napięcie znamionowe uzwojenia [V]	Napięcie pomiaru [V]
< 1000	500
1000-2500	500-1000
2501-5000	1000-2500
5001-12000	2500-5000
> 12000	5000-10000

przystąpieniem do wykonywania jakichkolwiek prac remontowych. Pomiar rezystancji izolacji w trybie IR jest automatycznie kończony po upływie zaprogramowanego czasu. Standardowo pomiar ten wykonywany jest po 60 sekundach.

W zależności od wartości napięcia znamionowego badanej maszyny pomiar rezystancji izolacji wykonujemy przy różnej wartości napięcia probierczego. Wartości tych napięć w pomiarze stanu izolacji wysokonapięciowych maszyn elektrycznych według literatury [9, 10, 13] przedstawiono w tabeli 1.

Trochę inne wartości napięć probierczych określa norma PN-E-04700:1998 [12]. Według tej normy pomiar rezystancji izolacji uzwojenia każdej fazy lub połączonych uzwojeń

reklama

reklama

wszystkich faz wykonuje się miernikiem rezystancji izolacji o napięciu co najmniej 2,5 kV.

W przypadku braku wymagań wytwórcy wynik pomiaru należy uznać za pozytywny, jeżeli rezystancja izolacji w MΩ uzwojenia o temperaturze  $t$ , mierzona po 60 s od momentu przyłożenia napięcia, jest nie mniejsza niż wartość wyznaczona z wzoru [12]:

$$R_{iz,t} = R_{iz,75} \cdot k_t \quad (2)$$

przy czym:

$$R_{iz,75} = \frac{U}{1000 + 10 \cdot S} \quad (3)$$

gdzie:

$U$  – napięcie znamionowe w V;

$S$  – znamionowa moc pozorna w MVA;

$k_t$  – współczynnik zależny od temperatury izolacji podczas pomiaru [12].

Uwzględnienie temperatury uzwojeń maszyny podczas pomiaru jest sprawą bardzo ważną, ponieważ ma ona bardzo duży wpływ na jej wartość. Wraz ze wzrostem temperatury rezystancja izolacji maleje. Norma PN-E-04700 podaje, że wartość rezystancji izolacji zmierzona w temperaturze 75°C nie powinna być mniejsza niż wartość wynikająca ze wzoru (3). Jeżeli pomiar wykonujemy w innej temperaturze, to w celu oceny otrzymanych wyników wartość wynikającą ze wzoru (3) musimy przeliczyć na tę temperaturę, w której wykonujemy pomiary, korzystając ze współczynników  $k_t$  podanych w tabeli 2.

**Tabela 2.** Wartość współczynnika przeliczeniowego rezystancji izolacji [12]

Temperatura izolacji ( $t$ ) podczas pomiaru	Wartość współczynnika $k_t$
1	2
10	12,3
15	10,2
20	8,4
25	7,0
30	5,7
35	4,4
40	3,8
45	3,2
50	2,6
55	2,2
60	1,7
65	1,5
70	1,2
75	1
80	0,8
85	0,7

Dla maszyn elektrycznych z chłodzeniem wodnym rezystancję izolacji należy mierzyć przy uzwojeniu pozbawionym destylatu i wewnątrz osuszonym.

W przypadku wykonywania próby napięciowej uzwojenia rezystancja izolacji zmierzona po próbie napięciowej nie powinna być mniejsza niż 80% wartości zmierzonej przed próbą [12].

#### 4.2. Współczynnik absorpcji DAR

Współczynnik absorpcji DAR definiowany jest jako stosunek rezystancji izolacji zmierzony po 60 s od momentu rozpoczęcia pomiarów ( $R_{60}$ ) do rezystancji zmierzonej po 15 s ( $R_{15}$ ). Stosunek ten nie powinien być mniejszy niż [11, 14]:

- 1,5 – w temperaturze 20°C;
- 1,4 – w temperaturze 40°C;
- 1,3 – w temperaturze 60°C.

Pomiar opiera się na założeniu, że w całym okresie próby napięciowej temperatura badanego obiektu jest mniej więcej stała, więc obliczony wskaźnik DAR jest niezależny od temperatury.

Poprzez pomiar współczynnika absorpcji DAR dowiadujemy się, czy układ izolacyjny jest suchy, zawilgocony, czysty czy zanieczyszczony. Umożliwia nam to podjęcie odpowiedniej decyzji w stosunku do wykonywania dalszych działań związanych z remontem maszyny. W przypadku okazania się, że stojan jest zanieczyszczony i wilgotny, należy bezwzględnie poddać go myciu oraz suszeniu. Podczas procesu suszenia należy kontrolować wartość rezystancji izolacji uzwojeń.

#### 4.3. Wskaźnik polaryzacji PI

Współczynnik polaryzacji PI definiowany jest jako stosunek rezystancji izolacji zmierzony po 10 min ( $R_{600}$ ) do rezystancji zmierzonej po 1 min ( $R_{60}$ ). Wskaźnik polaryzacji PI ( $R_{600}/R_{60}$ ) może być uznany za pozytywny, jeżeli uzyskane wartości wynoszą minimum [9, 15]:

- 1,5 – dla uzwojeń klasy A;
- 2,0 – dla uzwojeń klasy B;
- 2,0 – dla uzwojeń klasy F;
- 2,0 – dla uzwojeń klasy H.

Tutaj także pomiar opiera się na założeniu, że w całym okresie próby napięciowej temperatura badanego obiektu jest mniej więcej stała, w celu uniezależnienia wskaźnika PI od temperatury.

#### 4.4. Wskaźnik rozładowania dielektryka DD

Pomiar rozładowania dielektryka DD (eng. *dielectric discharge*) jest stosunkowo nową metodą badania stanu izolacji. W odróżnieniu od innych metod pomiarowych, w trakcie których mierzony jest prąd podczas ładowania dielektryka, w czasie pomiaru parametru DD mierzony jest prąd płynący w układzie izolacyjnym podczas rozładowywania dielektryka.

Pomiar ten jest testem diagnostycznym, pozwalającym ocenić stopień degradacji izolacji spowodowanej zatarzeniem się materiału oraz obecnością wtrącin gazowych w materiale izolacji. Wynik pomiaru zależy od charakterystyki rozładowania układu izolacyjnego, a więc badany jest stan wewnątrz materiału dielektryka, niezależnie od zanieczyszczeń powierzchniowych.



Aby układ izolacyjny mógł zostać odpowiednio zdiagnozowany, dielektryk musi być najpierw ładowany przez odpowiedni czas. Domyślnym i zalecanym czasem ładowania jest 30 minut. Po tym czasie układ izolacyjny powinien być całkowicie naładowany, a dielektryk spolaryzowany tak, by jedynym prądem w obwodzie pomiarowym był prąd upływu przez izolator. W trakcie rozładowywania składowa pojemnościowa prądu opada bardzo szybko, co jest wynikiem stosunkowo niedużej stałej czasowej obwodu rozładowania, rzędu kilku sekund. Druga składowa, którą jest prąd absorpcji, zanika znacznie wolniej ze względu na dużo większą stałą czasową rozładowania, sięgającą kilku minut (rys. 3).

Domyślnym czasem rozładowania w trybie DD jest 1 minuta. Po tym czasie należy dokonać pomiaru prądu rozładowania oraz pojemności układu izolacyjnego. Na podstawie znajomości napięcia probierczego użytego w pomiarach wartość parametru DD obliczana jest z zależności:

$$DD = \frac{I_{1\min}}{U \cdot C} \quad (4)$$

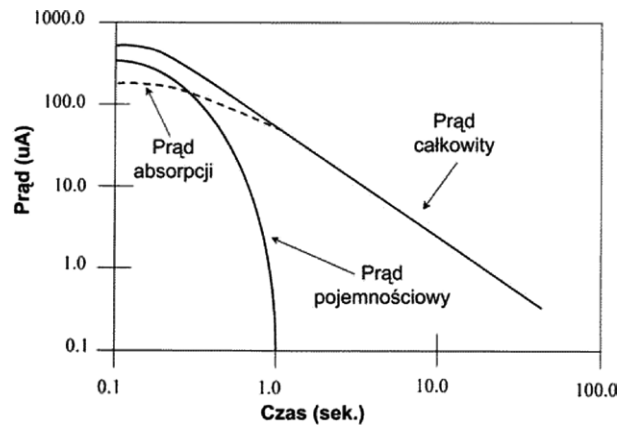
gdzie:

$I_{1\min}$  – wartość prądu w [mA] zmierzona po 1 minucie od rozpoczęcia rozładowywania izolacji;

$U$  – napięcie pomiarowe w [V];

$C$  – pojemność badanego układu izolacyjnego [F].

W wielowarstwowych układach izolacyjnych uszkodzenie jednej z warstw może nie wpłynąć znacząco na obniżenie wartości rezystancji izolacji. Taki stan awaryjny najczęściej jest niewykrywalny w normalnych pomiarach rezystancji izolacji oraz podczas wyznaczania współczynników  $DAR$  i  $PI$ . Jedynie pomiar współczynnika  $DD$  może ujawnić przepływ nadmiernego prądu absorpcyjnego, co może mieć miejsce podczas uszkodzenia lub zanieczyszczenia jednej z warstw wielowarstwowego dielektryka. Stała czasowa tej warstwy będzie inna



Rys. 3. Prądy płynące przez układ izolacyjny podczas rozładowywania dielektryka [13]

Tabela 3. Kryteria oceny pomiaru rozładowania dielektryka [13]

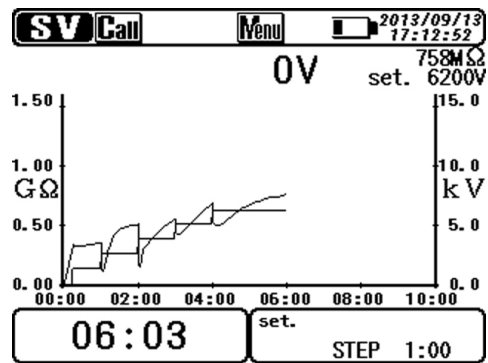
Wynik pomiaru DD	Stan izolacji
>7	Zły
4-7	Wątpliwy
2-4	Dobry
<2	Bardzo dobry

od stałej czasowej pozostałych warstw. Spowoduje to przepływ większego prądu niż w przypadku, gdy izolacja była jednolita (bez uszkodzeń). Kryterium oceny pomiaru rozładowania dielektryka przedstawiono w tabeli 3.

#### 4.5. Pomiar napięciem narastającym schodkowo SV

Pomiar napięciem narastającym schodkowo SV (ang. *step voltage*) opiera się na założeniu, że idealny izolator wykazuje stałą rezystancję izolacji niezależnie od wartości napięcia probierczego, natomiast izolator zestarzały, zanieczyszczony lub

zawilgocony wykazuje niższą rezystancję przy wyższych wartościach napięcia. Dla testu SV przeprowadzany jest standardowy pięciostopniowy pomiar trwający 5 minut, w którym napięcie probiercze jest co minutę skokowo zwiększane o jedną piątą końcowej wartości napięcia. Zakłada się, że odchyłki rezystancji izolacji większe niż 25% wskazują na obecność zanieczyszczeń lub wilgoci [13]. Na rysunku 4 przedstawiono przykład pomiaru rezystancji izolacji metodą SV uzwojeń stojana generatora o mocy 12,5 MVA i napięciu znamionowym 6,3 kV, o dobrym stanie układu izolacyjnego.



Rys. 4. Pomiar rezystancji izolacji (metodą SV) uzwojeń stojana generatora o mocy 12,5 MVA

**4.6. Wielokryterialna metoda prądu stałego**

Wielokryterialna metoda prądu stałego (WMPS) została wpisana do normy [12] jako metoda dodatkowa. Badanie układu izolacyjnego wg tej metody obejmuje następujące próby [6, 15]:

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

Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 5. Badanie odbudowy napięcia jest próbą najważniejszą dla diagnostyki stanu technicznego izolacji, oceny stopnia jej zużycia i prognozowania czasu niezawodnej pracy maszyny. Próbę odbudowy napięcia uzwojeń przeprowadza się przy napięciu:

- $U_O = 6 \text{ kV}$  – dla uzwojeń o napięciu znamionowym  $U_N \geq 6 \text{ kV}$ ;
- $U_O = U_N$  – dla uzwojeń o napięciu znamionowym  $6 \text{ kV} \geq U_N \geq 500 \text{ V}$ ;
- $U_O = 500 \text{ V}$  – dla uzwojeń o napięciu znamionowym  $U_N < 500 \text{ V}$ .

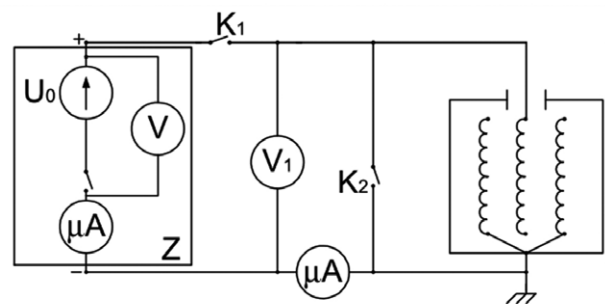
W oparciu o przeprowadzone pomiary wyznacza się następujące charakterystyki i parametry układu izolacyjnego:

- wykres rezystancji izolacji  $R_{60} = f(U)$  w zakresie napięcia od 0 do  $2U_N$ , z którego określa się rezystancję  $R_{60}$  przy  $U_N$ ;
- z ekstrapolacji krzywej  $R_{60} = f(U)$  szacuje się poziom napięcia przebicia  $U_p$  układu izolacyjnego;
- wykres odbudowy napięcia  $U_{od}(t)$  na układzie izolacyjnym, z którego odczytuje się czas odbudowy napięcia  $t_{od}$  i wartość maksymalną odbudowanego napięcia  $U_{od \max}$ ;
- współczynnik absorpcji układu izolacyjnego  $i_{p15}/i_{p60}$ ;
- poziom wahań prądu upływu  $i_{p60 \max}$  i  $i_{p60 \min}$  liczony po czasie  $t > 60 \text{ s}$  od chwili załączenia napięcia (dla stanu ustabilizowanego).

Otrzymane wyniki badań porównuje się z zawartymi w normie [12] kryteriami oceny stanu izolacji.

Stan techniczny układu izolacyjnego według tych kryteriów sklasyfikowany został w skali ocen od 5 do 0. Przedstawia się następująco:

- 5 punktów – izolacja nowa, której stan techniczny jest bardzo dobry;
- 4 punkty – izolacja dobra, może być to izolacja nowej maszyny, po remoncie lub kilkuletniej eksploatacji;



Rys. 5. Schemat układu pomiarowego do diagnostyki stanu technicznego izolacji [6]

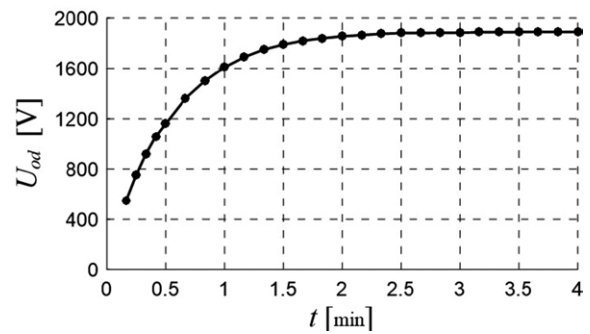
Tabela 4. Kryteria oceny stanu technicznego izolacji [6, 12]

Lp.	Parametr układu izolacyjnego	Ocena stanu technicznego izolacji						
		5	4	3	2	1	zawilgocona	
1	Napięcie przebicia $U_p/U_N$	>3	>3	>2	~1,5	~1	~1	
2	Rezystancja $R_{60}/U_N$ [kΩ/V]	przy $U_N = 6 \text{ kV}$	>50	>20	>10	>10	>10	<3
		przy $U_N \leq 1 \text{ kV}$	>50	>20	>10	>3	>1	<1
3a	Czas zwarcia dla $t_z$ [s]	dla $U_N = 6 \text{ kV}$	30	30	30	1	1	0
		dla $U_N < 6 \text{ kV}$	10	10	10	1	0	0
3b	Maksymalna wartość odbudowanego napięcia $U_{od \max}/U_O$		>0,1	>0,1	>0,05	>0,01	0	0
		Czas odbudowy napięcia $t_{od}$ [s]	dla $U_N = 6 \text{ kV}$	>240	>120	>30	~10	0
		dla $U_N \leq 1 \text{ kV}$	>120	>60	>15	~5	0	0
4	Wahania prądu upływu przy $U_N$ $\frac{i_{p60 \max} - i_{p60 \min}}{i_{p60 \text{sr}}}$	<0,5	<1	>1	>1	>2	0	
5	$i_{p15}/i_{p60}$	$U_N = 6 \text{ kV}$	>1,5	>1,2	>1	1	1	1
		$U_N \leq 1 \text{ kV}$	>1,3	>1,1	>1	1	1	1

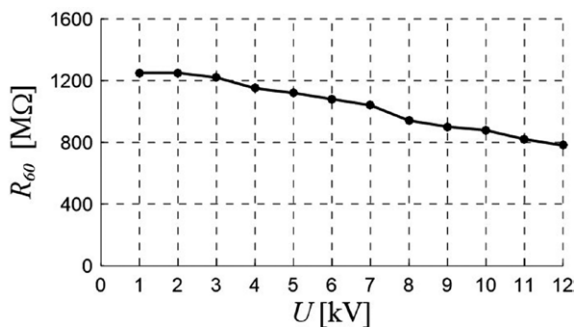
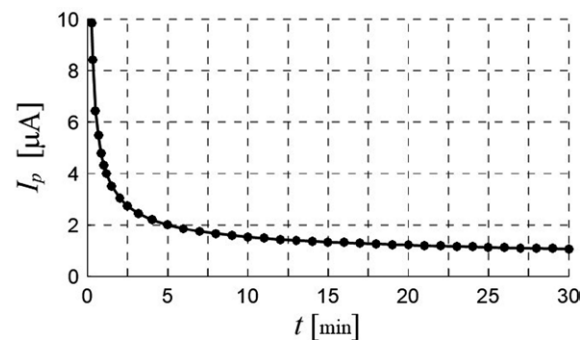
- 3 punkty – izolacja o zauważalnym stopniu zużycia, maszyna w okresie 2 do 3 lat powinna mieć przeprowadzony remont;
- 2 punkty – izolacja o dużym stopniu zużycia, maszyna w możliwie krótkim czasie powinna być odstawiona do remontu;



Rys. 6. Silnik indukcyjny dużej mocy



Rys. 8. Wykres odbudowy napięcia uzwojenia stojana silnika indukcyjnego dużej mocy

Rys. 7. Rezystancja izolacji  $R_{60} = f(U)$  uzwojenia stojana silnika indukcyjnego dużej mocy

Rys. 9. Przebieg prądu upływu izolacji uzwojeń stojana silnika indukcyjnego dużej mocy

- 1 punkt – izolacja zużyta, maszyna z takim stanem izolacji może w każdej chwili ulec awarii;
- 0 punktów – maszyna nienadająca się do eksploatacji z całkowicie zużytym układem izolacyjnym lub po awarii.

Przykładowe przebiegi z badań izolacji głównej uzwojenia stojana silnika indukcyjnego dużej mocy (rys. 6) przedstawiono na rysunkach 7, 8 i 9.



Należy zwrócić uwagę, że układ izolacyjny zużyty w stopniu 1 czy 2 może posiadać bardzo wysoką rezystancję izolacji, nawet kilka  $G\Omega/V$ , a więc ocena układu izolacyjnego na podstawie wartości rezystancji nie będzie wiarygodna. W podanej ocenie punktowej nie mieści się izolacja zawilgocona, którą rozpoznaje się po małej wartości rezystancji ( $< 10 k\Omega/V$ ), a którą należy wysuszyć. Już sam fakt, że izolacja wchłania wilgoć, świadczy o znacznym stopniu jej zużycia.

#### 4. Wnioski

Zapewnienie odpowiedniej niezawodności i wytrzymałości układu elektroizolacyjnego jest bardzo złożonym zagadnieniem konstrukcyjnym. Spowodowane jest to tym, że warunki eksploatacji – zwłaszcza bardzo dużych maszyn – mają istotny wpływ na narażenia izolacji, a co za tym idzie – na zmniejszenie wytrzymałości elektrycznej.


Diagnostyka układów izolacyjnych w oparciu o pomiary IR, DAR, PI, SV, DD opiera się na porównaniu wyznaczonych współczynników z wartościami zawartymi w normach oraz poradnikach branżowych. Prostota pomiaru napięciem stałym, małe gabaryty sprzętu pomiarowego oraz szybkość otrzymania wyników sprawiają, że metody te są powszechnie stosowane do ogólnej, a nawet zaawansowanej oceny stopnia zużycia izolacji.

Przedstawione w niniejszym artykule metody diagnostyczne są skutecznym narzędziem w diagnostyce układów izolacyjnych maszyn dużej mocy, a kompetentna ocena wyników badań pozwala określić stan techniczny izolacji uzwojeń oraz prognozować „czas życia” układu izolacyjnego. Służby odpowiedzialne za eksploatację np. generatorów mogą na bazie posiadanych wyników badań prowadzić odpowiedzialną politykę w zakresie przeglądów i remontów, które wykonywane w odpowiednich czasookresach wydłużają czas eksploatacji generatora oraz zabezpieczają przed skutkami awarii. Lepiej bowiem zapobiegać niż leczyć, gdyż koszt diagnostyki nie przekracza kilku % kosztów związanych z remontem, a koszty ewentualnej awarii są z reguły ogromne.

#### Literatura

- [1] DECNER A., GLINKA T., POLAK A.: *Obserwacja procesu starzenia izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych z wykorzystaniem metody napięcia stałego*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 76/2007.
- [2] DECNER A., GLINKA T., POLAK A.: *Wpływ czasu eksploatacji maszyn elektrycznych na stopień degradacji izolacji uzwojeń*. „Przegląd elektrotechniczny” 11/2006.
- [3] FLORKOWSKA B.: *Diagnostyka wysokonapięciowych układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych*. AGH, Kraków 2009.
- [4] FLORKOWSKA B., FLORKOWSKI M., WŁODEK R., ZYDROŃ P.: *Mechanizmy, pomiary i analiza wylądowań niezupełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia*. PAN, Warszawa 2001.
- [5] FLORKOWSKA B., MOSKWA S., NOWAK W., WŁODEK R., ZYDROŃ P.: *Modelowanie procedur diagnostycznych w eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia*. AGH, Kraków 2006.

- [6] GLINKA T.: *Badania maszyn elektrycznych w przemyśle*. KOMEL, Katowice 2002.
- [7] GLINKA T.: *Porównanie parametrów układu izolacyjnego maszyn elektrycznych o różnym stopniu zużycia*. Wyd. BOBRME, Katowice 2000, „Maszyny Elektryczne” 61/2000.
- [8] GLINKA T.: *Stan techniczny izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych i ich parametry wyznaczone napięciem stałym*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, nr 48, 20/2000.
- [9] IEEE43-2000 (R2006) – IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery.
- [10] KANDORA W.: *Diagnostyka offline izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych wykonanych w technologii Resin-Rich*. Rozprawa doktorska. Politechnika Opolska. Opole 2012.
- [11] PN-EN IEC 60034-27-4:2018 Maszyny elektryczne wirujące. Część 27-4: Pomiar rezystancji izolacji i wskaźnika polaryzacji izolacji uzwojenia maszyn elektrycznych wirujących.
- [12] PN-E-04700:1998 „Wytyczne przeprowadzania pomontażowych badań odbiorczych”.
- [13] Podręcznik diagnostyki izolacji powyżej 1 kV. Materiały MEGGER.
- [14] PRZYBYSZ J.: *Diagnostyka izolacji uzwojeń stojanów maszyn elektrycznych*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, nr 49, 2000.
- [15] Ramowa Instrukcja Eksploatacji Generatorów Synchronicznych. Energopomiar Elektryka Sp. z o.o., Gliwice 2009.
- [16] SZYMANIEC S.: *Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń i stanu łożysk silników indukcyjnych klatkowych w warunkach przemysłowej eksploatacji*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej 2006.
- [17] SZYMANIEC S.: *Diagnostyka offline stanu izolacji silników w przemyśle*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 74/2006.
- [18] SZYMANIEC S.: *Diagnostyka stanu izolacji silników indukcyjnych wysokonapięciowych offline w przemyśle*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 71/2005.

 dr inż. Piotr Zientek  
Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny,  
Zakład Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej  
w Transporcie, e-mail: Piotr.Zientek@polsl.pl;  
Waleria Łukaszewicz-Szmytka  
Politechnika Śląska,  
Wydział Elektryczny, Studenckie Koło Naukowe SEP  
e-mail: waleria.szm@gmail.com;  
mgr inż. Grzegorz Czempik  
ZPBE „ENERGOPOMIAR – ELEKTRYKA” Sp. z o.o.  
e-mail: grzegorz.czempik@elektryka.com.pl