

Zbigniew Ławrowski
Energotest-Diagnostyka, Brzezie k. Opola

BADANIA EKSPERYMENTALNE DOTYCZĄCE WYKORZYSTANIA METOD STAŁOPRĄDOWYCH DO DIAGNOSTYKI IZOLACJI MASZYN ELEKTRYCZNYCH

EXPERIMENTAL TESTS ELECTRICAL INSULATION OF ELECTRICAL MACHINES USING DIRECT CURRENT MEASUREMENT METHODS

Streszczenie: W artykule zostaną przedstawione wyniki badań niszczących izolacji silników indukcyjnych dużych mocy z wykorzystaniem różnych metod diagnostycznych na tym samym obiekcie. Celem tych badań jest poszukiwanie wzajemnych korelacji, których skutkiem jest otrzymanie trafnej diagnozy.

Abstract: The paper will be presented the results of destructive isolation of high-power induction motors using different diagnostic methods on the same object. The purpose of these tests is to look for correlations that result in getting a good diagnosis.

Słowa kluczowe: silnik indukcyjny, izolacja uzwojeń, diagnoza, metoda WMPS, współczynnik kondycji izolacji, wytrzymałości izolacji, wyładowań niezupełnych, Ramp Test

Keywords: motor induction, winding insulation, diagnosis, method WMPS, diagnostic factor for insulation, insulation strenght, partial discharges, Ramp Test

Wstęp

Pomiary diagnostyczne w czasie eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych, zarówno wytwórczych jak i napędowych, są znaczącym narzędziem zapewniającym niezawodność i poprawną ich eksploatację. Straty wynikające z ich przypadkowego wyłączenia spowodowane usterką, czasami przewyższają koszt zakupu nowego urządzenia. Jednym z kluczowych elementów niezawodności pracy urządzeń jest stan układu izolacyjnego. Takim reprezentatywnym przykładem powyższego problemu jest układ izolacyjny maszyn elektrycznych (generatorów, silników elektrycznych, transformatorów). Co raz większa liczba maszyn współpracuje z energoelektronicznymi układami zasilania, co nie pozostaje bez wpływu na żywotność powyższego układu izolacyjnego.

Nowe konstrukcje maszyn elektrycznych wysokiego i niskiego napięcia przeznaczone między innymi do współpracy z przekształtnikowymi układami zasilania wyposażone są w nowe rodzaje układów izolacyjnych, są to zazwyczaj kompozytowe izolacje żywiczne, nasączone próżniowo w wysokiej temperaturze. Oczywiście nie należy zapominać o całej masie układów tradycyjnych, które są znacznie słabsze. Wysokie napięcie i współpraca z przekształtni-

kowymi układami zasilania wiąże się ze zwiększeniem naprężeń elektrycznych.

Zdobyte doświadczenia eksploatacyjne i diagnostyczne w czasie ostatnich kilkunastu lat eksploatacji wykazały, że jednym z najbardziej istotnych narażeń związanych ze wzrostem napięcia roboczego i często zawartych w nim harmonicznych, są wyładowania niezupełne.

Do najczęstszych wyładowań niezupełnych zalicza się:

1. wyładowania w szczelinach i wtrącinach gazowych,
2. wyładowania powierzchniowe (ślizgowe),
3. wyładowania drzewiaste.

Istnieje szereg metod (narzędzi) [8], [9] [10], diagnostycznych umożliwiających z większym lub mniejszym prawdopodobieństwem śledzenie procesu starzenia i przewidywanie momentu uszkodzenia izolacji. Takimi metodami są: metody wykorzystujące do pomiaru napięcie zmienne oraz metody wykorzystujące napięcie stałe.

1. Metody wykorzystujące napięcie zmienne to:
 - a) Pomiar kąta stratności izolacji $tg\delta$ - charakterystyka $tg\delta=f(U)$.
 - b) Pomiar wyładowań niezupełnych WNZ, pomiar ładunku pozornego z ewentualną analizą np. typu „finger-print”.

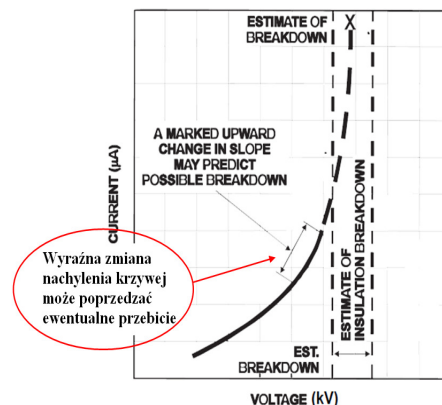
- c) Próby napięciowe, które są narzędziem bardzo nadwyrężającym układ izolacyjny, poza próbami fabrycznymi i odbiorczymi odchodzi się coraz częściej od ich stosowania.
2. Metody wykorzystujące napięcie stałe to:
- Induktorowy pomiar rezystancji izolacji dający bardzo ogólny pogląd np. na stan zawilgocenia, a nie mówiący o procesie starzenia.
 - Pomiar wyładowań niepełnych WNZ przy zasilaniu napięciem stałym [11]** włącznie z analizą statystyczną.
 - Wielokryterialna metoda prądu stałego (WMPS) polegająca na pomiarze charakterystyk: $I_{60} = f(U)$, $R_{60} = f(U)$ oraz przebiegów czasowych: $I_{lad} = f(t)$, $U_{odb} = f(t)$.** [1], [2], [3], [4], [5], [6]
 - Obliczony na podstawie charakterystyk i przebiegów czasowych metody WMPS **współczynnik kondycji izolacji L (patent nr 203761).** [5], [6], [7],
 - Metoda DC Ramp Test** wg normy IEEE Std 95TM-2002. [9].

W dalszej części artykułu zostanie omówiony jeden z przykładów badań niszczących jakie zostały przeprowadzone na silnikach indukcyjnych wycofanych z eksploatacji. Badania te przeprowadzono na stacji prób w firmie Energotest-Diagnostyka z wykorzystaniem zaawansowanych metod pomiarowych opartych między innymi na pomiarach napięciem stałym. Dla pewnych porównań wykonano też pomiary charakterystyk $\text{tg}\delta = f(U)$ oraz WNZ przy wykorzystaniu napięcia zmiennego.

Na wstępie zostanie przedstawionych kilka kluczowych elementów przy wykonywaniu pomiarów poszczególnymi metodami stałoprądowymi.

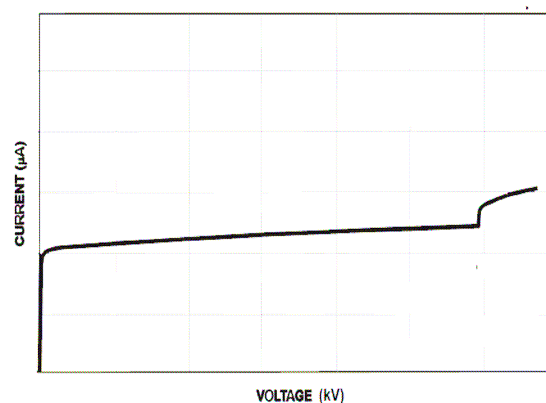
Na początek przedstawiono **Ramp Test** wg normy IEEE Std 95TM-2002. [10].

Pomiar metodą **Ramp Test** zobrazowany jest na rys.1, który przedstawia teoretyczną krzywą narastania prądu dla dobrego układu izolacyjnego. Wykonuje się go podając na badany układ izolacyjny płynnie narastające napięcie stałe z prędkością 2kV/min. Zaznaczona zmiana nachylenia krzywej ostrzega nas przed możliwym wystąpieniem uszkodzenia izolacji.



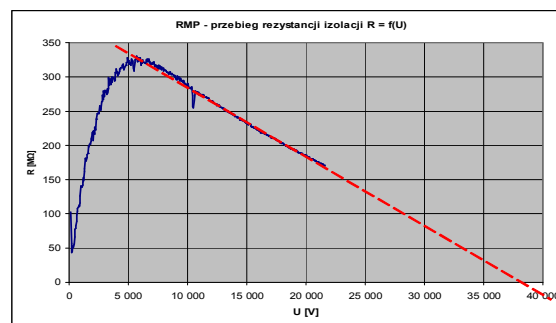
Uzwojenie na początku jest w dobrej kondycji, przy wyższym napięciu występuje ostrzeżenie możliwego przebicia.

Rys. 1. Teoretyczny przebieg prądu upływu w funkcji narastającego napięcia dla dobrej izolacji przy metodzie Ramp Test



Rys. 2. Przykład przebiegu prądu upływu podczas wykonania Ramp Testu dla wadliwie wyremontowanej izolacji epoksydowo-mikowej

Wykonany pomiar krzywej prądu w metodzie Ramp Testu wykorzystujemy generalnie do wyznaczenia hipotetycznego napięcia przebicia, sposób wyznaczania pokazany jest na rys. 3. Wykonane testy niszczące wielokrotnie potwierdziły skuteczność tego sposobu wyznaczania napięcia przebicia.

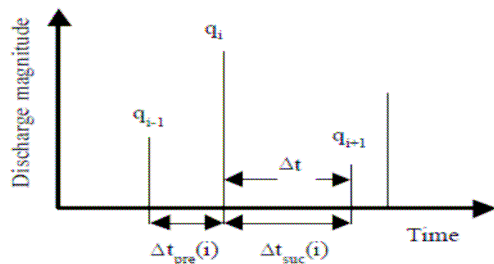


Rys. 3. Przykładowy przebieg Ramp Test-u przeliczony na rezystancję izolacji oraz wyznaczenie hipotetycznego napięcia przebicia

Kolejną metodą stałoprądową, jest metoda pomiaru wnz napięciem stałym.

Podczas pomiarów WNZ napięciem zmiennym, istotnym elementem są rozkłady fazowe pomiaru ładunku pozornego.

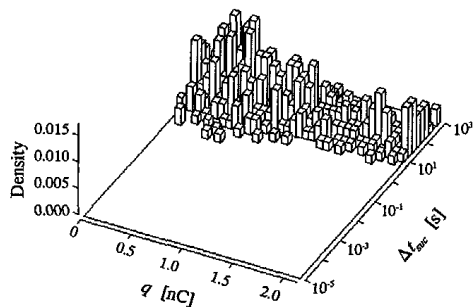
Pomiary WNZ napięciem stałym charakteryzują się natomiast tak zwanymi międzyczasami pomiędzy poszczególnymi wyładowaniami.



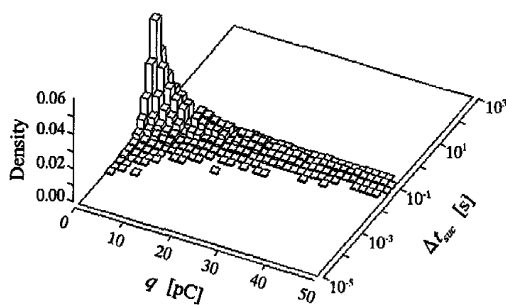
Rys. 4. Zasada pomiaru WNZ napięciem stałym

Wyładowania niezupełne w układzie izolacyjnym pracującym pod napięciem stałym charakteryzują się bardzo dużą przypadkowością. Z dwóch zmierzonych wartości (q , t), możemy obliczyć pochodne wielkości takie, jak Δt_{pre} i Δt_{suc} , są to czasy pomiędzy wyładowaniami tuż przed i tuż po wyładowaniu [11].

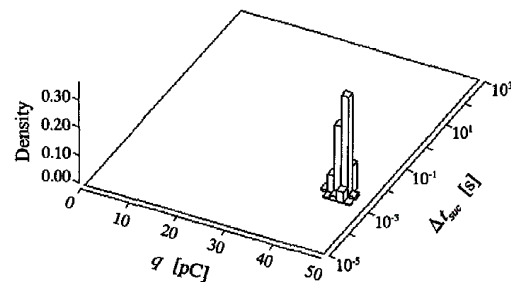
Z uwagi na obszerność zagadnienia nie będzie tutaj omawiana całość zagadnienia. Przytoczone zostaną typowe obrazy wyników dla poszczególnych rodzajów wyładowań.



Rys. 4. Histogram q - Δt_{suc} dla wyładowań powierzchniowych



Rys. 5. Histogram q - Δt_{suc} dla wyładowań w szczelinie Polietylenu (PE) $V=15kV$



Rys. 6. Histogram q - Δt_{suc} dla wyładowań koronowych $V=8kV$

Rysunek nr 4 przedstawia typowy obraz rozkładu ładunku dla wyładowań powierzchniowych, występuje on często przy izolacji zawilgoconej powierzchniowo i także zbrudzonej. Następnym przykładem jest histogram na rysunku nr 5 który przedstawia rozkład szczeliny polietylenu, jest on także zauważalny w izolacji żłobkowej generatorów i silników indukcyjnych. Rysunek nr 6 przedstawia natomiast histogram rozkładu dla wyładowania koronowego, brak jest ścieżki wyładowania wstęgowego.

Kolejną metodą, na którą zwrócono uwagę jest metoda WMPS (Wielokryterialna Metoda Prądu Stałego).

Dla przypomnienia metoda ta opiera się o pomiary następujących zależności: $R_{60}=f(t)$ i przebiegi czasowe $I_{lad}=f(t)$, $U_{odb}=f(t)$.

W oparciu o te zależności opracowany został empiryczny syntetyczny współczynnik kondycji izolacji L (Patent nr 203761).

$$DFL = \frac{I_{pu} U_n}{U_p} \cdot \left[\frac{\mu AV}{s} \right]. \quad [6]$$

Maszyna o dobrym stanie izolacji winna spełniać warunek:

$$DFL < DF_{LWZ}$$

Wzorcowy wskaźnik izolacji proponuje się wyznaczać na podstawie pomiarów nowej maszyny, wysuszonej, przed jej oddaniem do eksploatacji [8], [9].

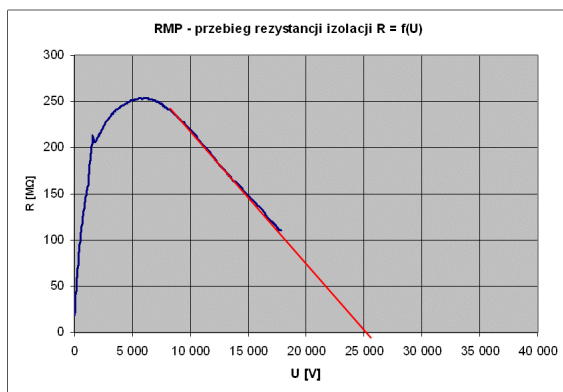
W dalszej części artykułu zostaną omówione wyniki badań eksperymentalnych, polegających na wykonaniu testów pomiarowych różnymi metodami na silnikach indukcyjnych dużych mocy o napięciu znamionowym pracy 6kV. Izolacja stojanów tych silników w następnej kolejności została zniszczona poprzez stopniowe zwiększenie napięcia testującego, aż do przebicia.

Przetestowano w ten sposób następujące silniki:

1. Typ SBDVdm-134tE; $P_n = 1000$ kW; $U_n = 6000$ V – 2szt.
2. Typ SZJre-158s/01; $P_n = 1700$ kW; $U_n = 6000$ V – 4szt.
3. Typ SZJre-134t-E; $P_n = 1000$ kW; $U_n = 6000$ V – 1szt.
4. Typ SZJre-136t-E; $P_n = 1000$ kW; $U_n = 6000$ V – 1szt.

Wyniki zgromadzonych pomiarów pozwoliły w większości potwierdzić wcześniej zaprezentowane wnioski [9].

Niżej zaprezentowane zostaną wyniki z prób silnika typ SBDVdm-134tE; $P_n = 1000$ kW; $U_n = 6000$ V.



Rys. 7. Przebieg rezystancji izolacji $R=f(U)$ podczas pomiarów RAMP-test silnika 6kV nr 128779, typ: SBDVdm134t, rok: 1987r

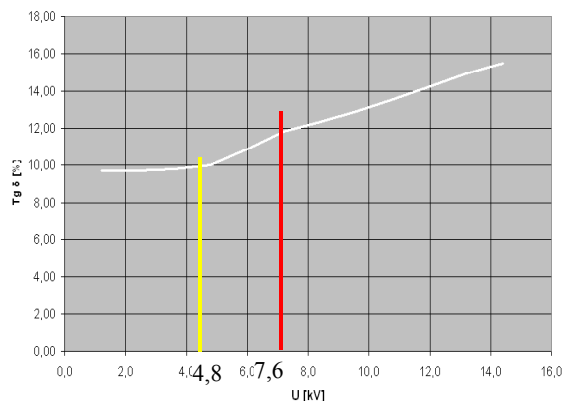
Na rysunku nr 7 przedstawiono przeliczony wykres Ramp Testu na wielkość zmieniającej się badanej rezystancji izolacji silnika typu SBDVdm134t. Wyznaczona wartość napięcia przebiecia wyniosła nieco powyżej 25kV, faktycznie silnik przebił w granicach 24kV, skąd błąd szacowania wyniósł 4%.

Przeprowadzone pomiary metodą WMPS umożliwiły wyznaczenie współczynnika kondycji izolacji DFL , jego wartość wyniosła:

$$DFL = 54 \quad (1)$$

Wyznaczona wartość współczynnika DFL świadczy o stosunkowo zużytej izolacji głównej silnika.

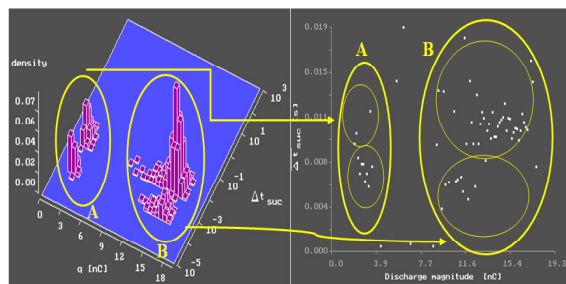
Na wykresie rys. 8 $tg\delta=f(U)$ dla badanej izolacji zaznaczono miejsca, gdzie zaczynają się pojawiać wyładowania WNZ, napięcie o wartości 4,8 kV oraz napięcie 7,6kV gdzie pojawia się zjawisko wyładowań lawinowych.



Rys. 8. Przebieg $tg\delta=f(U)$ badanego silnika typ SBDVdm-134tE; $P_n = 1000$ kW; $U_n = 6000$ V

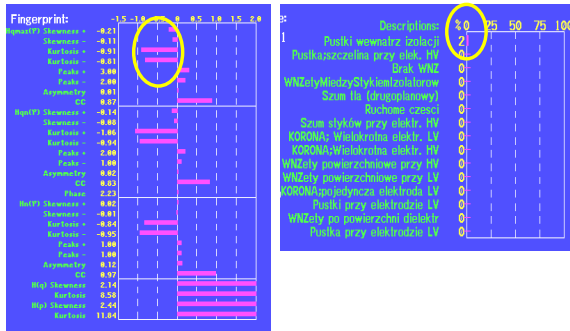
Napięcie zmienne skuteczne 7,6kV odpowiada napięciu szczytowemu o wartości 10,7kV, porównamy niektóre rozkłady ładunków dla tych wartości, wykonanych pomiarów napięciem stałym i zmiennym.

Przyjęto pewnego rodzaju założenie, zastosowane w celu uzyskania informacji na temat badanego układu izolacyjnego przy tej samej wartości amplitudy napięcia na układzie izolacyjnym.



Rys. 9. Wyniki rozkładów statystycznych ładunku pozornego: po lewej stronie histogram ilościowy wielkości ładunku i ilości wyładowań dla czasów bezpośrednio po wyładowaniu - Δt_{suc} ; po prawej stronie wielkość ładunku w funkcji czasu - Δt_{suc} ; pomiary przeprowadzono dla napięcia 10kV DC

Na rys. 9 przedstawiono rozkłady ładunku pozornego dla badanej izolacji silnika w/w napięciem 10kV DC, rozkłady te są typowe dla wyładowań szczelinowych i wtrącinach gazowych izolacji stałej.

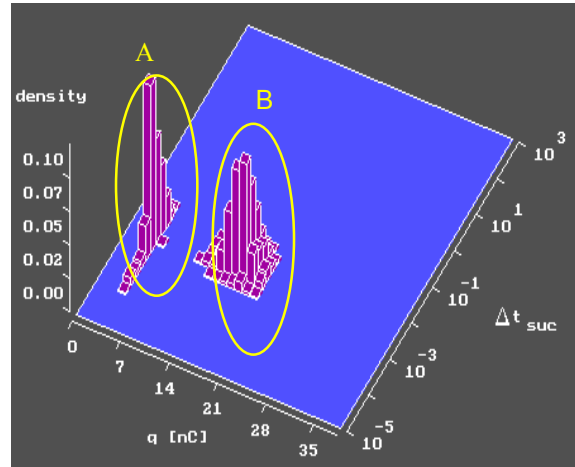


Rys. 10. Wyniki rozkładów statystycznych typu fingerprint dla badanego układu izolacyjnego silnika typu SBDVdm-134tE; Pn =1000 kW; Un=6000V – przyłożone zmienne napięcie pomiarowe o wartości 7,1kV AC

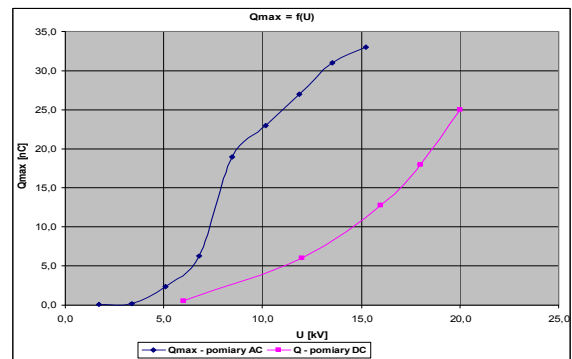
Rysunek nr 10 przedstawia wyniki pomiarów WNZ dla napięcia 7,1kV AC w postaci obliczeń fingerprint i klasyfikacji rodzajów wylądowań. Zaznaczone po lewej stronie elipsą wyniki skrośności i kurtozis odpowiadają wylądowaniom we wtrącinach gazowych i szczelinie. Po prawej stronie zaznaczono elipsą wynik analizy aparaturowej, który także potwierdza wylądowania w szczelinach.

Porównując analizy wykonane na podstawie pomiarów WNZ napięciem stałym i zmiennym można się pokusić o stwierdzenie, że analiza wykonana na podstawie pomiarów napięciem stałym daje bardziej przejrzystą informację o badanym układzie izolacyjnym. Przy badaniu WNZ napięciem stałym można zaobserwować więcej wad w izolacji które ujawniają się w bardziej naturalny sposób, nie są determinowane częstotliwością napięcia zasilającego. Przykładem może być obraz rozkładu ładunku na rys.11 dla napięcia 12kV DC w porównaniu do rozkładu na rys.9 dla napięcia 10kV DC, gdzie pewne źródła wnz o dużej częstotliwości „dopaliły” się i już nie występują. Analizując wykryte defekty, ich rodzaje i wielkość można ocenić stopień destrukcji badanej izolacji.

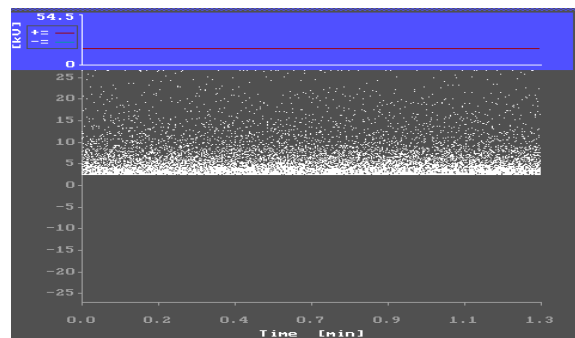
W badaniach potwierdzono także wcześniej zbadaną zależność [9] przedstawioną na rys.12, która obrazuje narastanie wielkości ładunku pozornego w funkcji przyłożonego napięcia stałego i zmiennego na układ izolacyjny. Zależność to potwierdza znacznie mniejsze działanie destrukcyjne stałego napięcia pomiarowego w czasie pomiarów w stosunku do napięcia zmiennego, występująca maksymalna wielkość ładunku pozornego jest znacząco mniejsza przy napięciu stałym.



Rys. 11. Wynik rozkładu statystycznego ładunku pozornego: histogram ilościowy wielkości ładunku i ilości wylądowań dla czasów bezpośrednio po wylądowaniu $-\Delta t_{suc}$ - dla napięcia 12kV DC, źródła wnz o dużej częstotliwości poniżej czasów 10^{-3} sek występowania „wypaliły się” (uległy zwarceniu)



Rys. 12. Przykładowe zależności od napięcia ładunku pozornego $Q = f(U_{AC})$; $Q = f(U_{DC})$



Rys. 13. Przykładowy obraz wylądowań WNZ zarejestrowany w czasie pomiaru po przyłożeniu stałego napięcia pomiarowego

Wnioski

1. Wykonane porównawcze badania niszczące napięciem stałym i zmiennym układów izolacyjnym silników indukcyjnych dużych mocy, ujawniły duże możliwości metod opartych na badaniach napięciem stałym. Badania napięciem stałym są także mniej osłabiające badany układ izolacyjny i wydaje się, że można uzyskać znacznie więcej informacji na temat badanego układu izolacyjnego.
2. Metoda WMPS w powiązaniu z metodą Ramp Testu zweryfikowana pomiarami WNZ napięciem stałym i zmiennym, jeszcze raz ujawniła swoją skuteczność stosowania.
3. Pierwotnie zaletą metody WMPS była tylko jej odporność na zakłócenia zewnętrzne, wadą natomiast była znaczna pracochłonność. Wymaganie dużej staranności wykonywania pomiarów, dotyczyło rejestrowanych napięć odbudowy. Wcześniej było to obciążone błędem subiektywnym obsługi. Obecne błędy odczytów zostały wyeliminowane, warunki rejestracji są powtarzalne z uwagi na zastosowanie z automatyzowanego układu pomiarowego [9].

Literatura

- [1]. Glinka T.: Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle. BOBRME KOMEL Katowice 1998.
- [2]. PN-E-04700 luty 1998.
- [3]. Glinka T.: Klasyfikacja stopnia zużycia izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych. Zeszyty Problemo-

we - Maszyny Elektryczne KOMEL, nr 68/2004, str.13-17.

- [4]. Hickiewicz J. i inni: Opracowanie metody i technologii diagnozowania stanu izolacji silników indukcyjnych wysokiego napięcia. Praca naukowo-badawcza dla Elektrowni „Opole” S.A. 1992 r.
- [5]. Ławrowski Z.: Diagnostyka silników klatkowych wysokiego napięcia w energetyce. Praca doktorska, Politechnika Śląska Gliwice, 1999r.
- [6]. Patent nr 203761 Na wynalazek Pt. Sposób oceny stanu izolacji badanej napięciem stałym.
- [7]. Hickiewicz J., Ławrowski Z.: Diagnostyka układów izolacyjnych dla różnych poziomów napięć pracy. Wiadomości Elektrotechniczne 2003 nr 4, str.167-170.
- [8]. Hickiewicz J, Ławrowski Z. Porównanie kryteriów oceny stanu izolacji maszyn elektrycznych. WE 2005 nr 4.
- [9]. Ławrowski Z.: Badania eksperymentalne izolacji silnika 6kV o mocy 1MW z zastosowaniem nowej konstrukcji aparatury diagnostycznej wykorzystujące metody WMPS i Ramp Test. Materiały konferencyjne – KOMEL Ryto 2011r.
- [10]. Metoda DC Ramp Test wg normy IEEE Std 95TM-2002 [8].
- [11]. „Digital HVDC Partial Discharge Testing” G. Hoogenraad, J. Beyer) ISEI 2000 HAEFELY High Voltage Test.

Autor

dr inż. Zbigniew Ławrowski
 Energotest-Diagnostyka
 46-021 Brzezie k.Opola
 E-mail: zlawrowski@energotest-diagnostyka.pl