

**Zbigniew Ławrowski**  
Energotest-Diagnostyka, Brzezie k.Opola

## **BADANIA EKSPERYMENTALNE IZOLACJI SILNIKA 6kV O MOCY 1MW Z ZASTOSOWANIEM NOWEJ KONSTRUKCJI APARATURY DIAGNOSTYCZNEJ WYKORZYSTUJĄCEJ METODY WMPS I RAMP TEST**

### **EXPERIMENTAL TESTS OF MOTOR INSULATION 6kV POWER OF 1MW USING A NEW CONSTRUCTION METHOD USING DIAGNOSTIC EQUIPMENT WMPS AND RAMP TEST**

**Abstract:** The paper pointed out the mechanism of partial discharges in insulating systems of electrical machines, which are the cause of deterioration of insulation strength. Against this background, demonstrating the new equipment using the latest technology measuring using the method of WMPS and Ramp Test

#### **Wstęp**

Badania diagnostyczne urządzeń elektroenergetycznych 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). Coraz 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 przekształtnikowymi 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 harmonicznym, są wyładowania niezupełne.

Do najczęstszych wyładowań niezupełnych zalicza się:

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

Pierwszy rodzaj wyładowań powstaje w źle nasyconym układzie izolacyjnym stojana gdzie w wyniku wadliwego nasycania powstały pęcherzyki powietrza i gazu. Także w czasie działań eksploatacyjnych poprzez częste rozruchy, zazwyczaj powstają szczeliny i pęknięcia. We wszystkich tych przestrzeniach bardzo skutecznie inicjują się wyładowania niezupełne. Zasilanie z układów przekształtnikowych pogłębia to zjawisko, produkując krótkie czasowe rzędu pojedynczych milisekund o wysokich amplitudach, przepięcia inicjujące skutecznie wyładowania niezupełne.

Drugi rodzaj wyładowań to wyładowania ślizgowe. Najczęściej związane są z lokalnymi zaburzeniami pola elektrycznego, przykładem mogą być: wyjście pręta czy cewki ze żłobka stojana, nieuwzględnienie kształtów czoł uzwojeń w stojanach, ostre krawędzie izolatorów przepustowych zarówno silników jak i transformatorów. Trzeci rodzaj wyładowań to wyładowania drzewiaste powstające w warstwach o znacznej grubości dielektryków syntetycznych jak polietylen. Narażenia te występują przeważnie w kablach energetycznych. Istnieje szereg metod (narzędzi) [8], [9] 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:
  - a) Pomiar kąta stratności izolacji  $\text{tg}\delta$  - charakterystyka  $\text{tg}\delta=f(U)$ .
  - b) Pomiar wyładowań niezupełnych, pomiar ładunku pozornego z ewentualną analizą np. typu „finger-print”.
  - c) Próby napięciowe, które są narzędziem bardzo nadwyrażającym układ izolacyjny, poza próbami fabrycznymi i odbiorczymi odchodzi się coraz częściej od ich stosowania.
2. Metody wykorzystujące napięcie stałe to:
  - a) Induktorowy pomiar rezystancji izolacji dający bardzo ogólny pogląd np. na stan zawilgocenia, a nie mówiący o procesie starzenia.
  - b) Pomiar wyładowań niezupełnych przy zasilaniu napięciem stałym włącznie z analizą statystyczną.
  - c) **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]
  - d) Obliczony na podstawie charakterystyk i przebiegów czasowych metody WMPS współczynnik kondycji izolacji  $\mathcal{L}$  (patent nr 203761).[6], [7],
  - e) Metoda DC Ramp Test wg normy IEEE Std 95<sup>TM</sup>-2002.

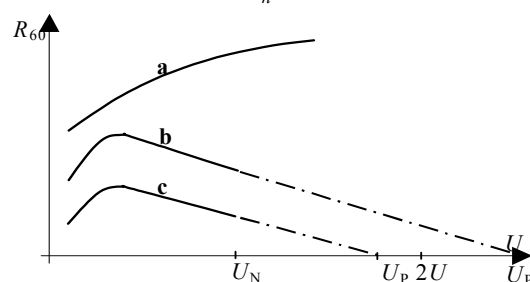
W dalszej części zostanie omówiona metoda WMPS. Można postawić pytanie: dlaczego do określenia stopnia zużycia izolacji silników zaproponowano metodę stałoprądową. Pomiar wyładowań niezupełnych przy poziomie napięcia zasilającego jest często bardzo utrudniony ze względu na czułość aparatury w stosunku do poziomu zakłóceń.

Diagnostyka układów izolacyjnych, szczególnie niskiego napięcia w eksploatacji do niedawna wydawała się sprawą stosunkowo trudną. Postęp w technikach pomiarowych, dostęp do nowoczesnych przyrządów o konstrukcji umożliwiających rejestrację prądów o wartości poniżej  $10^{-12}$  A oraz rejestrację napięć relaksacji przy pomocy komory Faradaya o oporności wewnętrznej nie mniejszej niż  $10^{14}$   $\Omega$ , umożliwił weryfikację i uściślenie kryteriów oceny w metodzie WMPS. Porównywanie ocen uzyska-

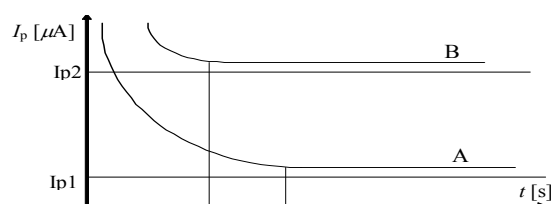
nych metodą WMPS z ocenami uzyskanymi innymi wcześniej wymienionymi metodami pozwoliło także na uściślenie kryteriów w metodzie WMPS. Wykorzystanie metody WMPS wydaje się stosunkowo skutecznym narzędziem z uwagi na wykorzystanie zjawisk powstawania napięcia relaksacji w wewnętrznych elektrycznych pojemnościach dielektryka (rys.4), które powstają we wszelkiego rodzaju wtrącinach powietrznych i pęknięciach. Należy także wspomnieć, że metoda ta jest stosunkowo odporna na zakłócenia zewnętrzne.

Wykorzystując zależność  $R_{60}=f(t)$  i przebiegi czasowe  $I_{lad}=f(t)$ ,  $U_{odb}=f(t)$  (rys.1, 2, 3). Został opracowany empiryczny syntetyczny współczynnik kondycji izolacji  $\mathcal{L}$  (Patent nr 203761).

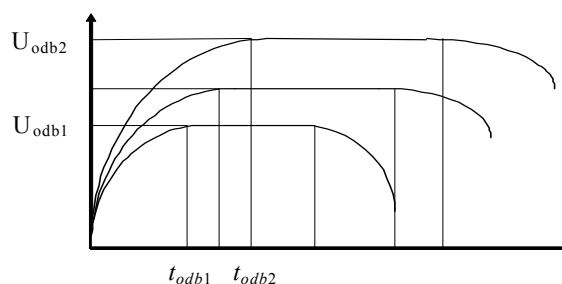
$$DFL = \frac{I_{pu}U_n}{U_p} \cdot \left[ \frac{\mu AV}{s} \right] \cdot [7]$$



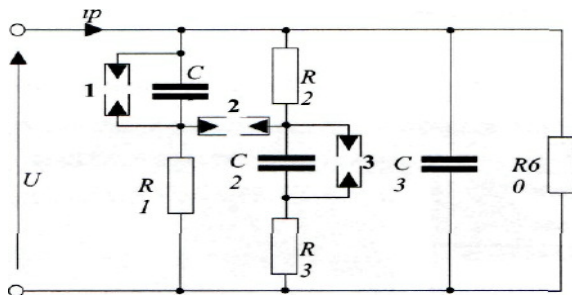
Rys. 1. Charakterystyka rezystancji izolacji  $R_{60}=f(U)$ , a-niewyznaczalne hipotetyczne napięcie przebicia, b-napięcie przebicia  $U_p > 2U_N$ , c- $U_p < 2U_N$



Rys. 2. Uogólniony obszar przebiegów czasowych  $I_p(t)$  w układzie izolacyjnym silników



Rys. 3. Uogólniony obszar charakterystyk  $U_{odb}=f(t)$



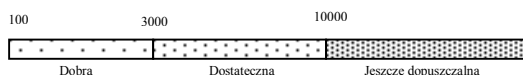
Rys. 4. Schemat zastępczy układu izolacyjnego

Maszyna o dobrym stanie izolacji winna spełniać warunek:

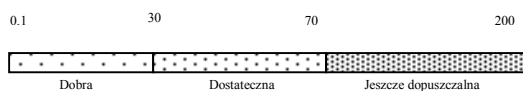
$$DF\bar{L} < DF\bar{L}_{wz}$$

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

Granice wartości liczbowych współczynnika  $\bar{L}$  są różne dla różnych rodzajów maszyn elektrycznych i różnych poziomów napięć pracy. W przypadku generatorów izolacji zakres liczbowy współczynnika  $\bar{L}$  podany jest na rys.5,6,7



Rys. 5. Granice liczbowe jakości izolacji dla generatorów na napięciu 22 kV



Rys. 6. Granice liczbowe jakości izolacji dla silników o napięciu pracy 6 kV

Granice liczbowe współczynnika  $\bar{L}$  dla silników 6kV zostały wyznaczone w oparciu o kilkutyсяczną ilość pomiarów na przestrzeni okresu 15 lat, obrazuje rys. 6.

Trzecim przykładem wykorzystania współczynnika  $\bar{L}$  jest jego wykorzystanie dla diagnozy izolacji stojanów silników 0,4kV. Na rysunku 7 podane są granice wartości współczynnika  $\bar{L}$  w zależności od stopnia zużycia izolacji.

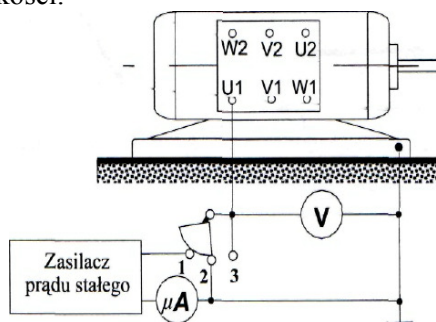


Rys. 7. Granice liczbowe jakości izolacji dla silników o napięciu pracy 400 V

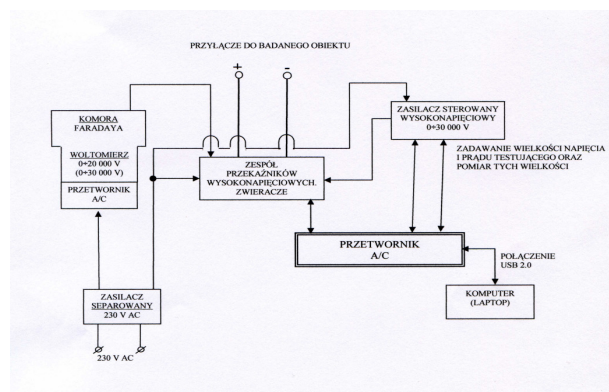
Zastosowanie nowoczesnych komponentów takich jak komora Faradaya z przetwornikiem A/C, sterowany cyfrowo pomiarowy zasilacz wysoko-napięciowy, przetwornik A/C, pozwo-

liły na zbudowanie nowoczesnego przyrządu pomiarowego Rys.9, który automatycznie przeprowadza testy układu izolacyjnego w oparciu o metodę WMPS wg Normy PN-E-04700 zał. A, oraz w oparciu o metodę Ramp Test wg Normy IEEE Std 95<sup>TM</sup>-2002. Skonstruowany system pomiarowy może diagnozować układy izolacyjne dla szerokiego zakresu napięć pracy, zarówno w zakresie niskiego (0,4kV) jak i wysokiego napięcia (6kV;15,75kV;22kV). Zakres pomiarowy napięć testujących zawiera się w przedziale 0V-30000V.

Skonstruowany przyrząd współpracuje bezpośrednio z komputerem poprzez łącze USB 2. Wyniki pomiarowe zapisywane są na dysku komputera w formie plików .xls co umożliwi wszechstronną obróbkę zarejestrowanych danych w Excelu. Niezależnie na ekranie komputera (rys.10) można obserwować rejestrację wyników w postaci cyfrowej jak i w postaci budującego się przebiegu czasowego rejestrowanej wielkości.



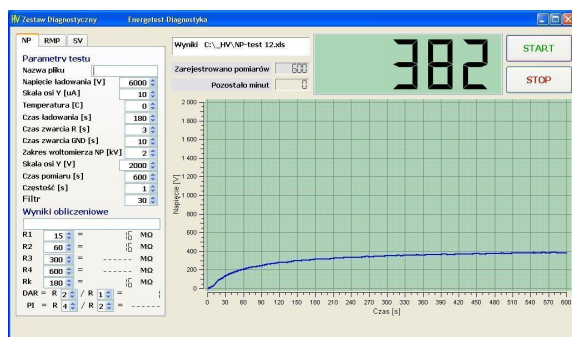
Rys. 8. Podstawowy układ pomiarowy do metody WMPS



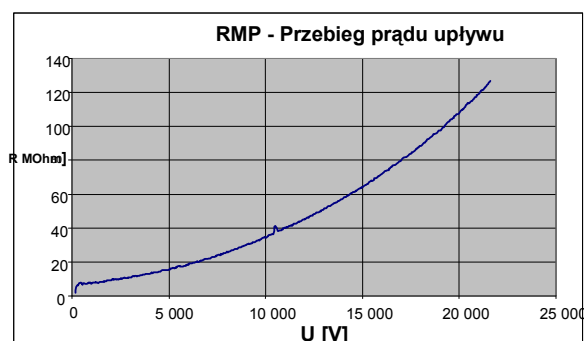
Rys. 9. Schemat blokowy systemu pomiarowego metody WMPS i RAMP-test

Można wprowadzić do obliczeń wielkości temperatury w celu przeliczania rejestrowanych wielkości zgodnie z obowiązującymi normami.

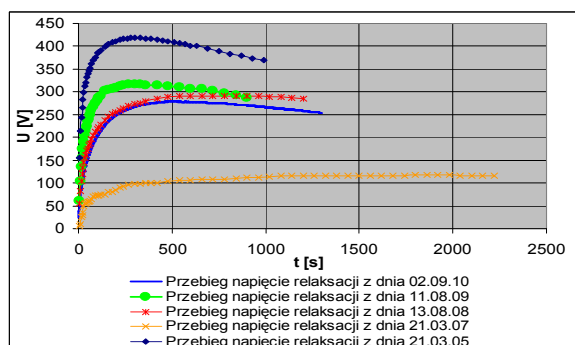
Dodatkowo przyrząd umożliwia zgodnie z Normą IEEE Std 95<sup>TM</sup>-2002, pomiar tak zwanego Ramp-Testu (rys.11). Można regulować czas przyrostu napięcia testującego w zależności od potrzeb.



Rys. 10. Przykładowy obraz ekranu przyrządu podczas rejestracji napięcia odbudowy



Rys. 11. Przykładowy przebieg prądu upływu układu izolacyjnego w funkcji narastającego napięcia testującego, tzw. ramp-test



Rys. 12. Przykładowe przebiegi czasowe napięcia odbudowy zarejestrowane w kilkuletnim okresie eksploatacji jednego silnika

W drugiej części artykułu zostaną przedstawione wyniki pomiarów izolacji jakie zostały wykonane na silniku indukcyjnym 6kV typ: SZJre-136t-E o mocy 1MW. Pomiary wykonano zarówno metodami wykorzystującymi zmienne napięcie pomiarowe jak i metodami wykorzystującymi stałe napięcie pomiarowe.

Testy pomiarowe były wykonywane do granicy wytrzymałości układu izolacyjnego badanego silnika, aż do jego zniszczenia.

Na rys.13, 14, 15, 16 zaprezentowano wyniki pomiarów dla metod wykorzystujących napięcie zmienne. Są to zależności  $tg \delta = f(U) Q_{max} = f(U)$  (wielkość ładunku pozornego maksymalnego w funkcji napięcia pomiarowego),  $I_{wyładowania} = f(U)$  (prąd wyładowania w funkcji napięcia pomiarowego) oraz fazowy rozkład wielkości ładunku pozornego i intensywności wyładowań.

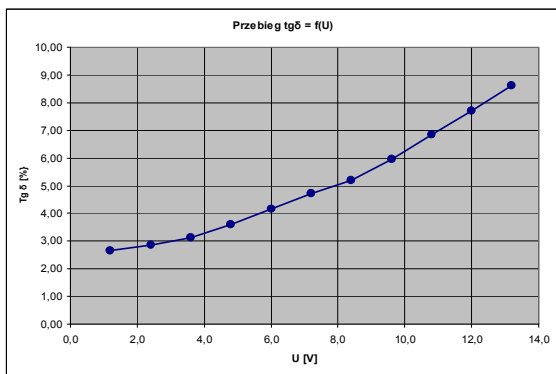
Na rys.17a i b przedstawiono wynik pomiarów dla metody Ramp Test. Rysunki 18, 19 przedstawiają wyniki dla metody WMPS (wykresy  $R_{izo} = f(U)$  przy skokowo narastającym napięciu 1kV) i wykres odbudowy napięcia dla trzech wielkości napięć ładowania (6kV, 10kV, 12kV). Na rys.20, 21, 22 przedstawiono wyniki pomiarów wyładowań niepełnych przy wykorzystaniu stałego napięcia pomiarowego. Rys. 20 przedstawia obraz zarejestrowanych wyładowań w czasie. Jeden biały punkt oznacza jedno wyładowanie, biała strefa w pobliżu wartości 0 ładunku przedstawia obraz szumu wynikającego z poziomu zakłóceń. Rysunek 21 przedstawia statystykę wyładowań w czasie rejestracji pomiaru, podzielono wyładowania na przedziały w zależności od ilości wyładowań. Rysunek 22 przedstawia trójwymiarowy obraz rozkładu wyładowań obrazujący: wielkość ładunku, intensywność wyładowań i czas pomiędzy poszczególnymi wyładowaniami.

Analizując przedstawione wyniki pomiarów daje się zauważyć pewne spostrzeżenia. Na rys.14 przedstawiono zależność ładunku pozornego maksymalnego w funkcji napięcia szczytowego (wykres niebieski) oraz zależność ładunku pozornego w funkcji napięcia stałego (wykres czerwony). Powyższe krzywe w przedziale 0-18kV mocno się od siebie oddalają, natomiast powyżej 18kV zaczynają się do siebie zbliżać. Wydaje się, że zetknięcie się tych dwóch krzywych zajdzie przy wartości napięcia zbliżonej do wartości hipotetycznego napięcia przebicia wyznaczonego na rys.17b. Jest to potwierdzenie, że wykonywanie testów napięciem stałym jest znacznie mniej narażające układ izolacyjny na zniszczenie niż badanie napięciem zmiennym.

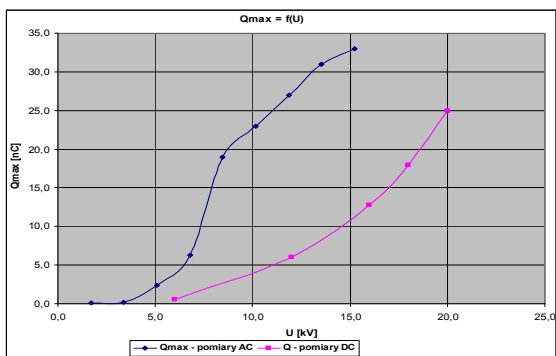
Kolejnym ciekawym spostrzeżeniem jest określenie wartości hipotetycznego napięcia przebicia przy wykreślaniu wykresu rezystancji izolacji przy skokowym podawaniu (co 1kV) napię-

cia pomiarowego (rys.18). Zauważyć można, że wyznaczenie napięcia przebicia na charakterystyce zdjętej do 10kV napięcia pomiarowego wynosi ok. 15kV. Im większy jest górny zakres napięcia pomiarowego, tym wartość wyznaczonego hipotetycznego napięcia przebicia jest większa. Wykonany test pomiarowy uwidocznił, że rzeczywista wartość napięcia przebicia wyniosła 31,1kV. Test ten jednak był wykonany po wielu pomiarach, przy których izolacja silnika była mocno narażana na przebicie, stąd nieznaczna rozbieżność z wyznaczonym hipotetycznym napięciem przebicia.

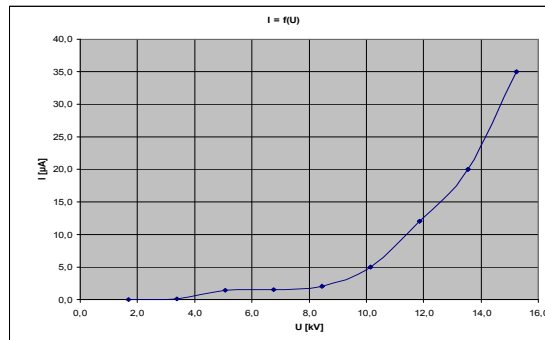
Z przeprowadzonych analiz pomiarów najbardziej przybliżoną hipotetyczną wielkość napięcia przebicia można wyznaczyć z pomiarów metodą Ramp Test. Przedstawia to rys.17b. (test przeliczony na rezystancje izolacji). Wyznaczone napięcie przebicia przez Ramp Test i faktyczne napięcie przebicia potwierdziły dobrą jakość izolacji badanego silnika. Jakość tą także potwierdził wyliczony wskaźnik kondycji izolacji „L”, który wynosił  $L=14,14$ . Wielkość wskaźnika mieści się w przedziale izolacji o dobrej kondycji (rys.6).



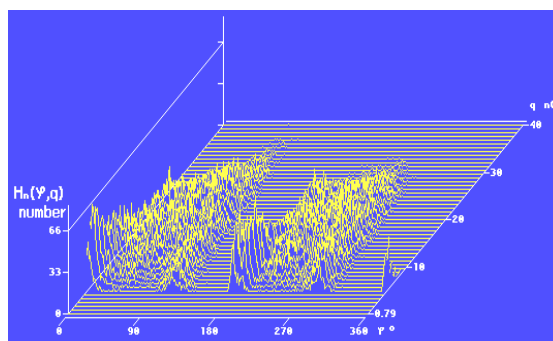
Rys. 13.  $tg\delta=f(U)$



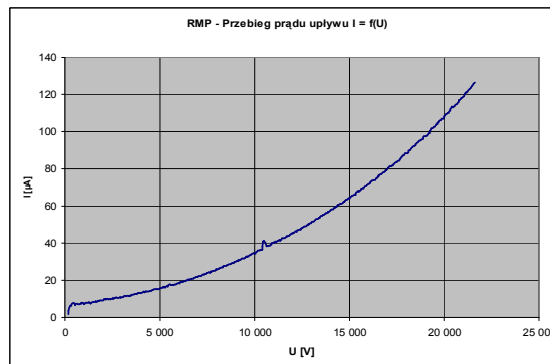
Rys. 14. Wyladowania  $Q=f(U_{AC})$   $Q=f(U_{DC})$



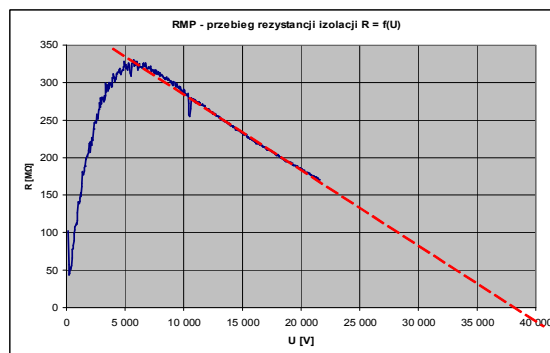
Rys. 15.  $I_{wyladowania}=f(U)$



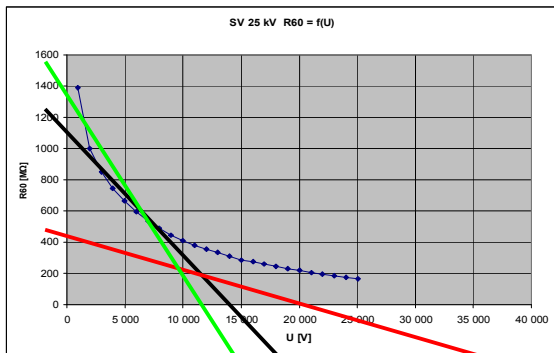
Rys. 16. Fazowy rozkład wielkości ładunku pozornego i ilości wyladowań



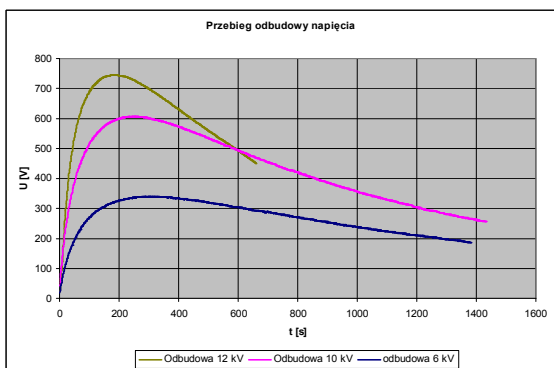
Rys.17a. Ramp Test  $J=f(U)$



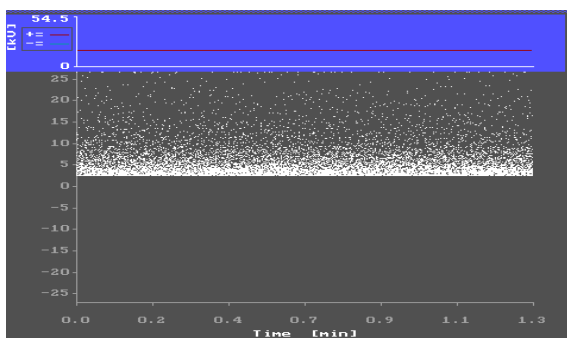
Rys. 17b Ramp Test przeliczony na rezystancje izolacji



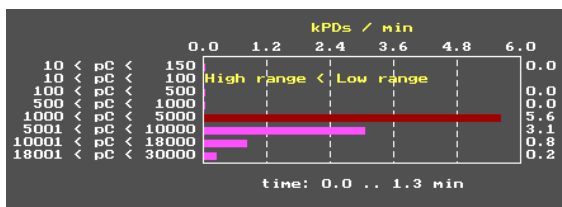
Rys. 18. Wykres izolacji  $R_{60}=f(U)$  ( $U=1;26kV$ )



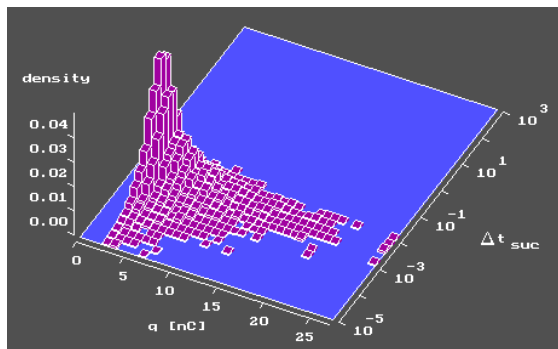
Rys. 19. Odbudowa napięcia



Rys. 20. Wyladowania DC= Q(f)/ wykres wyladowań niezupełnych przy pomiarach prądem stałym



Rys. 21. Rozkłady ilościowe wyladowań niezupełnych dla prądu stałego



Rys. 22. Rozkłady gęstości wyladowań niezupełnych dla prądu stałego

### Wnioski

1. 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 obarczone błędem subiektywnym obsługi. Obecne błędy odczytów zostały wyeliminowane, warunki rejestracji są powtarzalne.
2. Istnieje możliwość wprowadzenia warunków temperaturowych pomiaru do bezpośrednich przeliczeń w czasie rejestracji zgodnych z obowiązującymi normami.
3. Skonstruowany przyrząd umożliwia wykonanie pomiarów składowych metody WMPS w pełnym cyklu automatki, co znacznie oszczędza czas pracy.
4. Skonstruowany przyrząd może być zastosowany do maszyn elektrycznych w zakresie napięć pracy od 0,4kV (silniki n.n.) do 24kV (generatory)
5. Przyrząd może zostać wykorzystany do pomiarów transformatorów olejowych, zarówno do pomiarów izolacji jak i do określenia stopnia zawartości wody w izolacji papierowo-olejowej przy wykorzystaniu pomiarów napięć relaksacji ( odbudowy).
6. Przeprowadzony test zniszczeniowy układu izolacyjnego pozwolił zweryfikować możliwość wyznaczania hipotetycznej wielkości napięcia przebicia w zależności od zastosowanej metody
7. Przeprowadzone porównania krzywych wzrostu ładunku pozornego w funkcji napięcia pomiarowego zmiennego i stałego uwidaczniają jakie występuje narażenie układu izolacyjnego dla poszczególnych rodzajów napięć. Testy przeprowadzone napięciem stałym są znacznie

łagodniejsze dla układu izolacyjnego niż testy przeprowadzone napięciem zmiennym.

### Literatura

- [1]. Wajda D: Isledowanija powrezdenij izolacji. Energia Moskwa 1968.
- [2]. Glinka T.: Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle. BOBRME KOMEL Katowice 1998.
- [3]. PN-E-04700 luty 1998.
- [4]. Glinka T.: Klasyfikacja stopnia zużycia izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych. Zeszyty Problemowe KOMEL nr 68/2004, str.13-17.
- [5]. 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.
- [6]. Ławrowski Z.: Diagnostyka silników klatkowych wysokiego napięcia w energetyce. Praca doktorska, Politechnika Śląska Gliwice, 1999r.
- [7]. Patent nr 203761 Na wynalazek Pt. Sposób oceny stanu izolacji badanej napięciem stałym.
- [8]. Hickiewicz J., Ławrowski Z: Diagnostyka układów izolacyjnych dla różnych poziomów napięć pracy. Wiadomości Elektrotechniczne 2003 nr 4, str.167-170.
- [9]. Hickiewicz J, Ławrowski Z. Porównanie kryteriów oceny stanu izolacji maszyn elektrycznych. WE 2005 nr 4.

### Autor

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