



Barbara FLORKOWSKA, Paweł ZYDRŃ

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki

## Wybrane metody badań i analizy stanu materiałów i układów izolacyjnych wysokiego napięcia

**Streszczenie.** Badania własności materiałów i układów izolacyjnych mogą być wykonywane różnymi metodami, w tym metodami elektrycznymi. Narzędziem diagnostycznym mogą być: metody spektroskopii impedancyjnej – pozwalające na ocenę ogólnego stanu badanego obiektu oraz pomiary wyładowań niepełnych – umożliwiające wykrywanie i rozpoznawanie defektów lokalnych. Możliwości takich badań są przedmiotem niniejszego artykułu.

**Abstract.** Investigations of electrical insulating materials and systems are made by different methods. Electrical non-invasive methods could also be used for materials and system structure assessment. Impedance spectroscopy (IS) is a tool giving inside view in material properties changing its global electric parameters. In opposition, local defects in materials could be detected by using partial discharge measurement methods. Possibilities of such investigation are presented in the paper. (Selected methods of investigations of electrical insulating materials and high-voltage systems).

**Słowa kluczowe:** wysokonapięciowe układy izolacyjne, metody badań, spektroskopia impedancyjna, wyładowania niepełne.

**Keywords:** high voltage insulation systems, testing methods, impedance spectroscopy, partial discharges.

### Wstęp

W warunkach wolnego rynku energii elektrycznej istotnym zadaniem stojącym przed jednostkami realizującymi jej wytwarzanie, przesył i dystrybucję jest minimalizacja kosztów. Z tego powodu nowego znaczenia nabierają problemy związane z oceną stanu technicznego poszczególnych urządzeń, stanowiących elementy systemu elektroenergetycznego. Zachowanie tradycyjnego podejścia w dziedzinie eksploatacji nie pozwala na uzyskanie niezbędnej niezawodności i skracania czasów zaistniałych awarii. Współczesne podejście do tego problemu cechuje przede wszystkim ścisły rachunek kosztów oraz szacowanie ryzyka niedotrzymania warunków dostawy energii elektrycznej. Prowadzi to do opracowywania i wdrażania nowych strategii eksploatacji infrastruktury technicznej [1, 2].

Współczesne metody diagnostyczne stosowane do oceny stanu wysokonapięciowych materiałów i układów izolacyjnych oraz rozpoznania zachodzących w nich procesów przemian strukturalnych – pod wpływem różnych narażeń eksploatacyjnych roboczych i awaryjnych – pozwalają na rozszerzenie zakresu uzyskiwanych informacji. Do metod tych należą m.in. metody spektroskopii dielektrycznej oraz pomiary i analiza wyładowań niepełnych [3-8]. Ich podstawę stanowią obserwacje zjawisk fizycznych związanych z przewodnictwem prądu elektrycznego, procesami polaryzacji elektrycznej oraz zjawiskami generowania, gromadzenia i przemian energetycznych ładunków elektrycznych w strukturach materiałów i układów izolacyjnych. Metody te są użyteczne w ocenie dielektryków, w szczególności polimerów elektroizolacyjnych oraz materiałów kompozytowych. Szczególną grupę stanowią materiały niejednorodne, w tym układy wykazujące zjawiska polaryzacji warstwowej tzw. polaryzacji relaksacyjnej Maxwella-Wagnera lub polaryzacji ładunku przestrzennego. Należy podkreślić, że niektóre cechy materiałów, jak np. zwiększona przewodność, polaryzowalność i inne, mogą ulegać zmianie dopiero po pewnym okresie użytkowania materiału w strukturze eksploatowanego urządzenia. Może to być efektem występujących narażeń termicznych, mechanicznych, współpracy z innymi materiałami, lub pozostawania w warunkach oddziaływania czynników agresywnych chemicznie.

W podlegających ocenie materiałach i układach izolacyjnych:

- zmiany ich właściwości mogą dotyczyć całej objętości i mogą następować w sposób ciągły w całym okresie użytkowania, albo też
- zmiany te mogą mieć wyłącznie charakter lokalny, jako efekt powstawania defektów strukturalnych (pęknięć, rozwarstwień, mikroinkluzji gazowych).

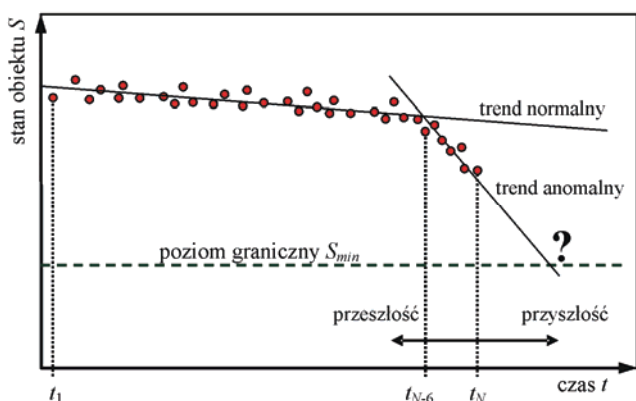
Artykuł opisuje wybrane zagadnienia metod spektroskopii impedancyjnej oraz pomiaru i analizy wyładowań niepełnych stosowanych w badaniach układów izolacyjnych wysokiego napięcia w Laboratorium Wysokich Napięć Katedry Elektroenergetyki AGH.

### Zadania systemów monitorowania i diagnostyki urządzeń elektroenergetycznych

Układy izolacyjne wysokiego napięcia stanowią jeden z podstawowych elementów funkcjonalno-konstrukcyjnych urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia. Ich własności fizyczne oraz odporność na oddziaływanie różnego rodzaju narażeń wpływają w decydujący sposób na żywotność urządzeń, co ma istotne znaczenie ekonomiczne. Z tego też powodu coraz większego znaczenia nabiera prowadzenie obsługi eksploatacyjnej zgodnie z zasadami strategii *CBM* (ang. *Condition Based Maintenance*) ograniczającej wykonywanie napraw i remontów do wybranych obiektów, uzyskujących negatywne oceny, wydane w oparciu o prowadzone badania diagnostyczne. Pozwala to na racjonalne i efektywne gospodarowanie zasobami technicznymi, przy równoczesnym wzroście niezawodności ich działania. Stosowanie tego rodzaju zasad prowadzi do konieczności rozwijania i wdrażania nowych metod pomiarowo-diagnostycznych, opartych na posiadanej wiedzy teoretycznej, modelowaniu, symulacjach numerycznych, badaniach laboratoryjnych oraz doświadczeniach eksploatacyjnych. Stosowanie w serwisie eksploatacyjnym strategii *CBM* prowadzi do zastąpienia metodyki obsługi urządzeń technicznych bazującej na harmonogramach przeglądowo-remontowych, podejściem opartym na ocenie rzeczywistego stanu danego urządzenia. Pociąga to za sobą konieczność ponoszenia kosztów związanych ze stosowaniem nowych metod diagnostycznych, opartych coraz częściej na pomiarach typu *on-line*, na pracujących urządzeniach, w miejscu ich zainstalowania.

Wspomniana ocena diagnostyczna stanu układu izolacyjnego musi uwzględniać współczesny stan wiedzy teoretycznej o danym rodzaju izolacji, a także mieć związek z indywidualnymi doświadczeniami eksploatacyjnymi jej użytkownika.

Istotnym czynnikiem zwiększającym wiarygodność diagnozy jest możliwość obserwacji zmian stanu obiektu w dłuższym okresie czasu, wykraczającym poza podstawowy interwał czasu pomiędzy sąsiednimi obserwacjami. Stan, który samodzielnie może być uznawany za poprawny (zgodny z wymaganiami określonymi w normach lub przepisach – w tym np. wewnętrznych instrukcjach spółki dystrybucyjnej) w połączeniu z analizą trendu czasowego może świadczyć o niepokojących objawach, występujących w pracy urządzenia. Przykład znaczenia linii trendu dla właściwej oceny przewidywanego „czasu życia” urządzenia przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Wpływ analizy linii trendu na wynik diagnozy

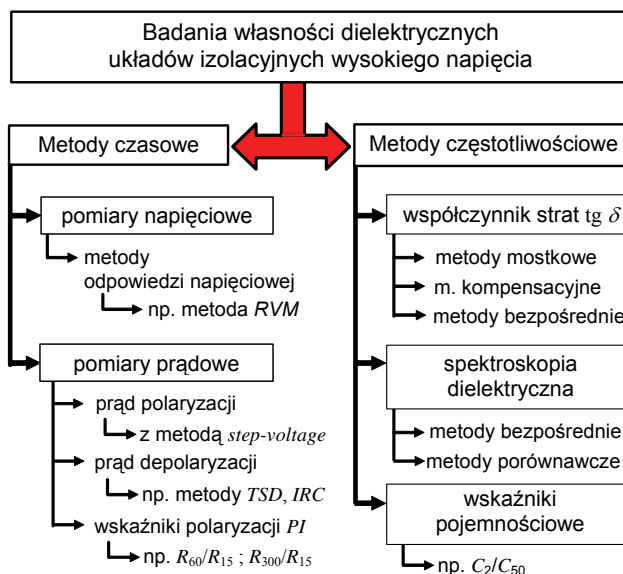
Analizując wcześniejsze wyniki badań urządzenia, poprzedzające chwilę obecną  $t_N$  można dojść do wniosku, że w wyniku zdarzenia, które wystąpiło w czasie około chwili  $t_{N-6}$  nastąpiła istotna zmiana linii trendu stanu obserwowanego obiektu  $S$ . Trend normalny odpowiadający naturalnemu starzeniu obiektu został zastąpiony trendem anomalnym związanym z zaistniałym (rozwijającym się) uszkodzeniem. Pomimo tego, że stan urządzenia w chwili bieżącej  $t_N$  jest jeszcze właściwy należy rozważyć podjęcie decyzji o zwiększeniu częstotliwości jego kontroli lub wyłączeniu z ruchu i wykonaniu dokładniejszych badań diagnostycznych.

Całą procedurę diagnostyczną mającą na celu określenie stanu urządzenia i wydanie diagnozy można podzielić na wiele niezależnych etapów, których liczba jest zależna od stopnia uszczegółowienia. W pierwszym, ogólnym przybliżeniu można wyróżnić trzy podstawowe etapy:

- akwizycję danych;
- ekstrakcję parametrów diagnostycznych;
- selekcję (grupowanie) i podjęcie decyzji.

### Badanie układów izolacyjnych metodami obserwacji odpowiedzi dielektrycznej

Badanie i analiza odpowiedzi dielektrycznej układu izolacyjnego pozwala na ocenę jego stanu „w całości”. Stosowana w tej metodzie obserwacja napięć lub prądów na zewnętrznych elektrodach obiektu powoduje, że następuje efekt uśrednienia wpływu poszczególnych efektów i zjawisk fizycznych. Własności dielektryczne materiałów wchodzących w skład układów izolacyjnych wysokiego napięcia mogą być badane przy wykorzystaniu metod bazujących na pomiarach w dziedzinie czasu lub dziedzinie częstotliwości. Schemat blokowy podziału tych metod przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Metody pomiarowe w badaniach własności dielektrycznych

Pomiary w dziedzinie czasu dotyczą badań wykonywanych przy zastosowaniu pobudzenia układów napięciem stałym lub impulsowym. Obejmują one dwie główne grupy metod wykorzystujące rejestrację dwóch wielkości obserwowanych na zewnątrz układu izolacyjnego tzn. odpowiedzi napięciowej lub prądowej. W każdej z grup stosowane są ich specyficzne odmiany np. zawierające inne sekwencje czasowe sygnału napięciowego, pobudzającego układ izolacyjny. Efektem pobudzenia tzn. włączenia lub wyłączenia napięcia są charakterystyczne dla danego układu izolacyjnego stany przejściowe wynikające z zachodzących procesów relaksacyjnych.

Metody częstotliwościowe obejmują badania przy napięciu przemiennym i dotyczą zarówno klasycznych pomiarów współczynnika strat  $\tan \delta$ , jak również pomiarów szerokopasmowych np. metodami impedancyjnej spektroskopii dielektrycznej.

Z problematyką pomiarów odpowiedzi dielektrycznej w sposób bezpośredni związane są zagadnienia:

- wyboru modeli odwzorowujących zachodzące w układach izolacyjnych zjawiska relaksacyjne;
- struktury i stopnia skomplikowania elektrycznych schematów zastępczych;
- dopasowania danych pomiarowych do modeli i wyznaczenia parametrów badanych układów.

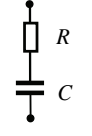
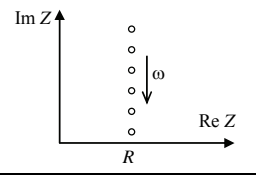
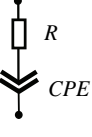
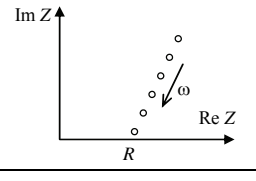
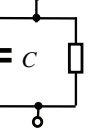
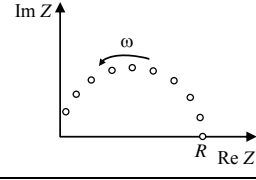
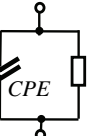
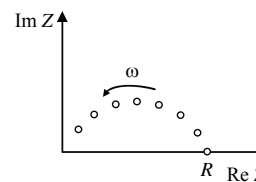
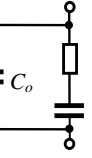
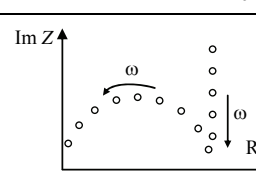
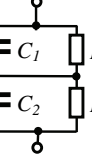
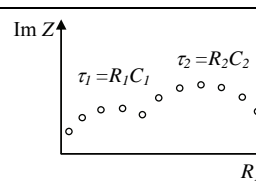
Przykładowo, w chwili obecnej stosuje się co najmniej kilkanaście modeli opisujących zjawiska relaksacyjne w dielektrykach, mających postać teoretycznych lub empirycznych wzorów matematycznych [9-11]. Dla potrzeb diagnostycznych tworzone są jednak często prostsze w analizie schematy zastępcze, charakteryzujące się ograniczoną liczbą elementów i ściśle zdefiniowaną topologią.

### Spektroskopia impedancyjna

Spektroskopia impedancyjna (SI) jest metodą umożliwiającą rozpoznanie i analizę własności fizyko-chemicznych materiałów i układów izolacyjnych drogą pomiaru wielkości elektrycznych. Obszar jej zastosowań dotyczy nie tylko dielektryków stosowanych w układach izolacyjnych, ale również elektrochemii, materiałów półprzewodnikowych, czy też próbek biologicznych, w których istotną rolę odgrywają parametry elektryczne. Metodą tą określane są parametry charakteryzujące własności materiałów, związane ze zjawiskami przewodnictwa elektrycznego i polaryzacji elektrycznej.

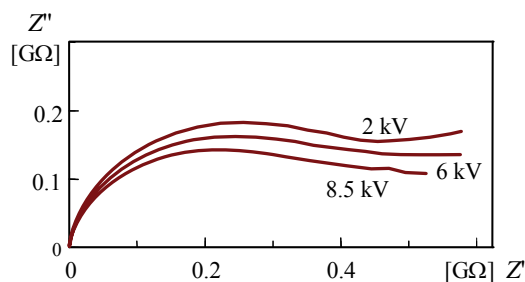
Celem spektroskopii impedancyjnej jest określenie szerokopasmowej funkcji przenoszenia badanego obiektu, a podstawowymi wielkościami pomiarowymi są zależne częstotliwościowo: impedancja  $Z(\omega)$  lub admitancja  $Y(\omega)$ . Na bazie tych wielkości, w oparciu o uzyskane charakterystyki szerokopasmowe możliwe jest bardziej lub mniej dokładne dopasowanie wartości poszczególnych elementów modelowych schematów zastępczych (Tab.1).

Tabela. 1. Modelowe schematy zastępcze

L.p.	Schemat zastępczy	Charakterystyka $Z'-Z''$
1		
2		
3		
4		
5		
6		

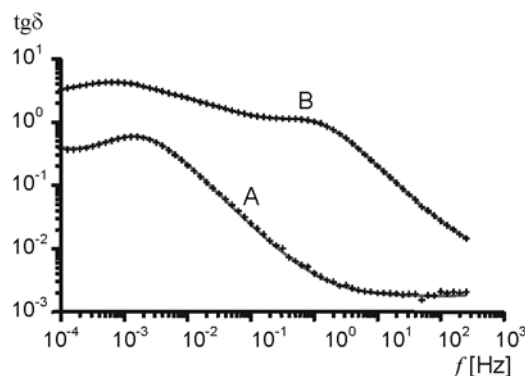
Schematy zastępcze układów izolacyjnych mogą być modelowane przy zastosowaniu elementów  $R$  i  $C$ , ale również przy użyciu elementów o innych charakterystykach  $Z'-Z''$ . Takim elementem jest np. element  $CPE$  (ang. *Constant Phase Element*), którego charakterystyka posiada stałe nachylenie na płaszczyźnie zespolonej  $Z'-Z''$  i pozwala na tworzenie charakterystyk 2 i 4 z tabeli 1. Dzięki temu, przy mniejszej liczbie elementów możliwe jest dokładniejsze modelowanie układów rzeczywistych, w których występują zjawiska dyspersji.

Schemat zastępczy 6 z tabeli 1 może reprezentować uproszczoną warstwową strukturę układu izolacyjnego kabla papierowo-olejowego. Na rysunku 3 przedstawiono wyniki szerokopasmowych pomiarów impedancji kabla 15 kV. Analiza zmian wartości zespolonej impedancji w zależności od stosowanego napięcia probierczego wskazuje na występowanie efektów nieliniowych [6].



Rys. 3. Charakterystyka  $Z'-Z''$  dla odcinka kabla 15kV z izolacją papierowo-olejową, badanego przy trzech różnych wartościach napięcia probierczego ( $f = 0,01 \div 100\text{Hz}$ ) [6]

W badaniach materiałowych wiele cennych informacji dotyczących własności i stanu badanych próbek lub układów niesie analiza występujących w nich strat dielektrycznych. Są one określane poprzez pomiar współczynnika strat dielektrycznych określanego wartością tangensa kąta strat  $\text{tg}\delta$ . Wielkość ta może być wyznaczana jako stosunek  $\epsilon''/\epsilon'$ . Na rysunku 4 przedstawiono charakterystyki częstotliwościowej zmienności  $\text{tg}\delta$  izolacji dwóch transformatorów rozdzielczych: nowego, jeszcze nie eksploatowanego (A) i ponad 50-letniego (B). Przy modelowaniu izolacji metodą schematów zastępczych mogą być zastosowane różne ich topologie, w tym proponowana przez grupę roboczą CIGRE [5]. Dla wyników z rysunku 4 w miejsce elementów  $C$  stosowano elementy  $CPE$ . Dopasowując wartości elementów schematów użyto oprogramowania wykorzystującego algorytm Levenberga-Marquarda, minimalizując błąd średniokwadratowy. Analiza prezentowanych wyników w oparciu o [4] pozwala potwierdzić dobry stan izolacji transformatora A i fatalny transformatora B.



Rys. 4. Charakterystyki częstotliwościowej zmienności kąta strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$  dla izolacji dwóch transformatorów rozdzielczych: A) jednostka nowa; B) wyłączona z eksploatacji jednostka ponad 50-letnia

### Pomiary wyładowań niezupełnych

Opisane impedancyjne metody spektroskopowe pozwalają na ocenę zmian własności wywołanych np. zawilgoceniem lub zachodzącymi procesami starzeniowymi. W przypadku defektów lokalnych, przy spełnieniu pewnych wymagań [8], możliwe jest zastosowanie metody elektrycznej polegającej na pomiarze wyładowań niezupełnych. Jest to czułe narzędzie badawcze pozwalające na wykrycie mikrodefektów, pęknięć, rozwarstwień i inkluzji gazowych występujących w materiałach izolacyjnych lub na granicy pomiędzy materiałem izolacyjnym a przewodzącym (półprzewodzącym).

Zgodnie z definicją, wyładowania niezupełne (wnz) są wyładowaniami występującymi wewnątrz układu izolacyjnego, ograniczonymi tylko do pewnej jego części oraz nie wywołującymi bezpośrednio całkowitego zwarcia międzyelektrodowego [12]. Obejmują one szereg różnych

form wyładowań występujących w układach izolacyjnych stałych, ciekłych i gazowych, przy czym dla oceny struktury materiałów i ich własności ważna jest możliwość badania mikrodefektów w materiałach stałych.

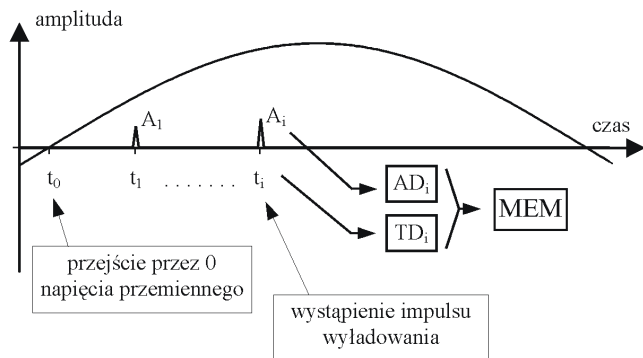
Metoda pomiaru wnz bazuje na detekcji impulsów prądu powstającego podczas wyładowania. Współczesne systemy rejestracji i analizy wyładowań niezupełnych mierzonych przy napięciu przemiennym stosują różne metody, jedną z nich – bardzo często stosowaną – jest metoda analizy fazowo-rozdzielczej PRPDA (ang. *Phase Resolved Partial Discharge Analysis*), w której dla każdego wyładowania zostają zarejestrowane dwie podstawowe wielkości:

- amplituda impulsu wyładowania  $A_i$ ;
- moment (faza) wystąpienia impulsu  $t_i(\varphi_i)$ .

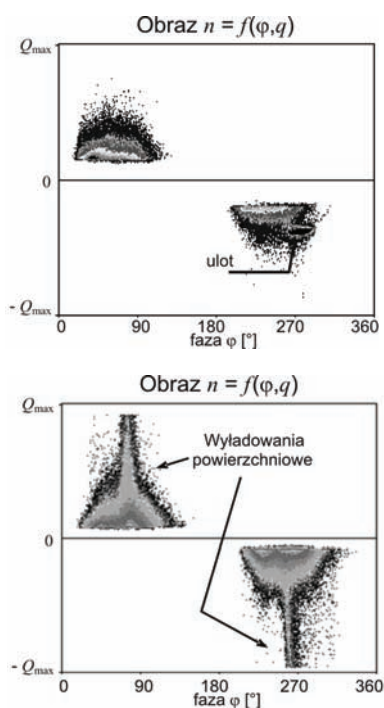
Jako moment wystąpienia impulsu przyjmowany jest czas mierzony od początku rejestracji, to jest od chwili przejścia przez zero sinusoidy napięcia probierczego (rys. 5). Ponadto jako wielkość dodatkowa bywa również rejestrowana:

- wartość chwilowa napięcia probierczego w chwili wystąpienia wyładowania  $U_i$ .

Na podstawie powyższych wielkości, po uwzględnieniu parametrów obiektu badanego oraz toru pomiarowego, możliwe jest wyznaczenie innych wielkości charakteryzujących materiał [8].



Rys. 5. Rejestracja fazowo-rozdzielcza wyładowań niezupełnych



Rys. 6. Przykłady obrazów fazowo-rozdzielczych wyładowań niezupełnych w przestrzeni  $\varphi$ - $q$ - $n$  [8]

Metoda rejestracji obrazów fazowo-rozdzielczych wyładowań niezupełnych stanowi połączenie rozdzielnej rejestracji rozkładów amplitudowych i fazowych. Jej podstawą są tworzone podczas pomiarów tzw. *obrazy  $\varphi$ - $q$ - $n$*  wyładowań niezupełnych, stanowiące odwzorowanie liczby impulsów wyładowań o określonym ładunku i określonej fazie. Wynikiem są rozkłady  $D(\varphi, q, n)$  w przestrzeni *faza-ładunek-liczba*. Rysunek 6 przedstawia przykłady obrazów fazowo-rozdzielczych wykorzystywanych do oceny stanu badanego materiału lub obiektu.

## Podsumowanie

Nieinwazyjne, elektryczne metody pomiarowe stanowią podstawowe lub alternatywne narzędzie diagnostyczne względem innych metod fizyko-chemicznych służących badaniu i ocenie materiałów i układów izolacyjnych.

Techniki spektroskopii impedancyjnej, badania strat dielektrycznych oraz pomiary wyładowań niezupełnych dają możliwość oceny ogólnych własności wysokonapięciowych układów izolacyjnych oraz wykrywania defektów i anomalii o charakterze lokalnym.

W Katedrze Elektroenergetyki AGH prowadzone są badania dla oceny własności układów izolacyjnych z zastosowaniem opisanych metod i niezbędnej aparatury pomiarowej. Efektem prac było między innymi powstanie kilku systemów pomiarowych do rejestracji i analizy wyładowań niezupełnych.

## LITERATURA

- [1] Florkowska B., Moskwa Sz., Nowak W., Włodek R., Zydrón P., Modelowanie procedur diagnostycznych w eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia, UWND AGH, 2006
- [2] Gulski E., Smit J.J., Maksymiuk J., Zarządzanie zasobami sieci elektroenergetycznych, OWPW, Warszawa, 2004
- [3] Kuffel E., Zaengl W.S., Kuffel J., High voltage engineering - Fundamentals, 2nd ed., Newness Press, 2000
- [4] Zaengl W.S., Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment, *El. Insul. Mag.*, vol. 19, no 5, pp. 5-19, and vol. 19, no 6, pp. 9-22, 2003
- [5] Gubanski S.M. et. al., Dielectric response methods for diagnostics of power transformers, *Electra*, No. 202, 25-35, June 2002
- [6] Florkowska B., Jackowicz-Korczyński A., Włodek R., Zydrón P., Investigation of HV insulation properties - selected time and frequency domain methods, IEEE CEIDP 2003 Annual Report, pp. 498-501, Albuquerque, New Mexico, USA, 2003
- [7] Florkowska B., Zydrón P., Wysokonapięciowa spektroskopia impedancyjna w badaniach układów izolacyjnych wysokiego napięcia, *Przegląd Elektrotechniczny Konferencje, Rok 2, nr 1'2004*, str. 65-68, Warszawa, 2004
- [8] Florkowska B., Florkowski M., Włodek R., Zydrón P., Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niezupełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia, Wyd. IPPT PAN, Warszawa, 2001
- [9] Jonscher A.K., Dielectric relaxation in solids, *Chelsea Dielectrics Press*, London, 1983
- [10] Havriliak Jr S., Havriliak S.J., Dielectric and mechanical relaxation in materials - Analysis, interpretation, and application to polymers, *Hanser Publishers*, 1997
- [11] Macdonald J.R. (ed.), Impedance spectroscopy emphasizing solid materials and systems, *John Wiley & Sons*, New York, 1987
- [12] IEC-60270, High-voltage test techniques - Partial discharge measurements, ed. 3, 2000

## Autorzy:

prof. dr hab. inż. Barbara Florkowska, e-mail: [beflor@agh.edu.pl](mailto:beflor@agh.edu.pl);  
dr inż. Paweł Zydrón, e-mail: [pawel.zydron@agh.edu.pl](mailto:pawel.zydron@agh.edu.pl); Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków