



Barbara FLORKOWSKA<sup>1</sup>, Marek FLORKOWSKI<sup>2</sup>, Paweł ZYDRŃ<sup>1</sup>

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki (1), ABB Centrum Badawcze - Kraków (2)

## Wpływ wyższych harmonicznych na mechanizm wyładowań niezupełnych w izolacji żywicznej

**Streszczenie.** Referat przedstawia zagadnienia dotyczące układów izolacyjnych wysokich i średnich napięć związane z pomiarami i interpretacją wyładowań niezupełnych (wnz), powstających w warunkach oddziaływania napięć odkształconych. Obecność wyższych harmonicznych prowadzi do zmiany parametrów narażeń napięciowych, jakim poddawane są układy izolacyjne. Równocześnie stanowi ona czynnik, utrudniający wykonanie pomiarów oraz ich jednoznaczną interpretację. Wymienione problemy opisano na przykładzie pomiarów wnz w izolacji żywicznej.

**Abstract.** (Influence of higher harmonic components on partial discharge mechanism in resins insulation). Paper describes problem related to measurements and interpretation of partial discharges (PD) in high and medium voltage insulation systems in presence of high voltage harmonics, with special focus on epoxy resin based insulation.

**Słowa kluczowe:** wyładowania niezupełne (wnz), harmoniczne napięcia, diagnostyka układów izolacyjnych.

**Keywords:** partial discharge (PD), voltage harmonics, diagnostic of insulation systems.

### Wstęp

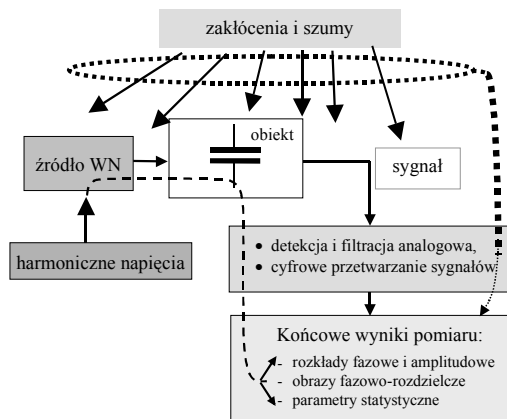
Pomiary wyładowań niezupełnych (wnz) stanowią jedno z podstawowych narzędzi diagnostycznych układów izolacyjnych wysokiego napięcia, pozwalających na stosunkowo wczesne wykrywanie i lokalizację ich ewentualnych defektów [1]. Postęp w dziedzinie metod pomiarowych oraz tendencje rozwojowe ostatnich lat sprawiają, że wraz z wprowadzaniem do diagnostyki nowych metod analizy danych istotnego znaczenia nabierają zjawiska nie uwzględniane wcześniej w tego typu pomiarach. Stosowane obecnie i rozwijane metody rejestracji i analizy wyładowań niezupełnych zmiernają do automatycznego rozpoznawania form wyładowań oraz lokalizacji ich źródeł, związanych z różnego rodzaju defektami, występującymi w układach izolacyjnych. Wśród najczęściej stosowanych metod analizy wyładowań można wyróżnić dwie podstawowe grupy. W *pierwszej* - podstawą analizy są dane rejestrowane w postaci rozkładów fazowych i amplitudowych: liczby, ładunku i energii wyładowań. Określony zestaw parametrów statystycznych tych rozkładów stanowi indywidualny identyfikator (ang. *fingerprint*) aktualnego stanu badanego układu izolacyjnego. *Druga grupa* wykorzystuje tzw. *obrazy fazowo-rozdzielcze* tworzone przez częstość występowania wyładowań  $n$  na płaszczyźnie fazowo-ładunkowej  $\varphi$ - $q$ . Obydwie metody charakteryzują się stosowaniem rejestracji amplitud impulsów wyładowań wraz z informacją o ich położeniu fazowym względem początku okresu sinusoidy napięcia probierczego, a więc z uwzględnieniem wymagań zawartych w znowelizowanej wersji normy IEC-60270 [2]. Ocena stanu izolacji lub też rozpoznanie rodzaju defektu polega na porównaniu cech zbioru danych uzyskanych podczas pomiarów na badanym obiekcie, z cechami zbiorów zarejestrowanych wcześniej i tworzących wraz zestawem odpowiednich reguł wnioskowania *bazę wiedzy diagnostycznej* [3]. Wykorzystanie jej w praktyce wymaga jednak świadomości co do możliwości występowania wówczas napięć odkształconych, podczas gdy baza tworzona była przy napięciu sinusoidalnym. Jest to zatem problem poprawnej identyfikacji i klasyfikacji obrazów wnz [4]. Odrębną grupę zagadnień stanowią badania procesów degradacji materiałów w układach izolacyjnych, których stan podlega ocenie metodami pomiaru wnz. Występowanie (nawet dorywczo) składowych harmonicznych

w napięciu probierczym wpływa na mechanizm wyładowań niezupełnych w wyniku lokalnego zwiększenia lub zmniejszenia szybkości narastania napięcia, i w efekcie dynamikę procesów starzeniowych. Charakterystykę tego problemu, w oparciu o badania wyładowań niezupełnych w żywicy epoksydowej przedstawiono w niniejszym artykule.

### Harmoniczne napięcia – charakterystyka problemu

Istotnym czynnikiem, mającym wpływ na wyniki pomiarów jest występowanie różnego rodzaju zakłóceń, co w szczególności dotyczy badań obiektów w miejscu ich zainstalowania, metodami pomiarów *on-line*. Zakłócenia obecne w trakcie pomiarów mogą pochodzić z różnych źródeł, różny też może być charakter ich oddziaływania. W długoletniej praktyce pomiarów wyładowań niezupełnych zwracano uwagę przede wszystkim na zakłócenia wysokoczęstotliwościowe – zarówno wąsko- jak i szeroko-pasmowe – występujące w układzie probierczym lub przenikające z zewnątrz do toru pomiarowego wyładowań. Było to spowodowane wpływem tych zakłóceń na możliwości detekcji i wyodrębnienia impulsów wyładowań oraz stosowanymi metodami diagnostycznymi, opartymi w większości przypadków na pomiarze maksymalnego ładunku pozornego wyładowań oraz na analizie rozkładów amplitudowych. Wraz z rozwojem wymienionych na wstępie metod pomiaru i analizy wnz, w których istotne jest położenie fazowe rejestrowanych impulsów wyładowań, zaczęto rozważać wpływ oddziaływań o bardzo niskich częstotliwościach tzn. zakłóceń harmonicznych zmieniających kształt napięcia probierczego [4-12]. Na rysunku 1 przedstawiono drogę efektywnego oddziaływania zakłóceń harmonicznych na wyniki pomiarów wyładowań w porównaniu do wpływu zakłóceń szeroko- i wąskopasmowych o wyższych częstotliwościach. Oddziaływanie zakłóceń harmonicznych nie jest możliwe do eliminacji w sposób podobny do innych rodzajów zakłóceń. Mechanizm inicjowania wyładowań niezupełnych wewnątrz dielektryka zależy od wielu czynników fizycznych oraz geometrii układu izolacyjnego. Biorąc pod uwagę podstawowy model „*a-b-c*” tego układu [1], najważniejszym czynnikiem decydującym o powstawaniu wyładowań jest wartość natężenia pola elektrycznego  $E$  w źródle wyładowań, związana bezpośrednio ze stosowanym

napięciem probierczym. Pomijając czynnik stochastyczności powstawania wyładowań, kształt napięcia w sposób zasadniczy określa częstość wyładowań oraz tworzenie się grup fazowych impulsów. Rozpatrując mechanizm inicjowania wyładowań, a następnie ich pomiary w kategoriach *podbudzenia* (wysokie napięcie) i *odpowiedzi* (powstające impulsy wyładowań) odkształcenie napięcia sinusoidalnego w sposób oczywisty wpływa na wyniki pomiarów, w tym lokalizację fazową wyładowań. Prowadzi to w efekcie do modyfikacji uzyskiwanych rozkładów amplitudowych i fazowych oraz obrazów fazowo-rozdzielczych.



Rys. 1. Droga wpływu harmonicznego napięcia na wyniki pomiarów wyładowań niepełnych

Gdy w obwodzie wysokiego napięcia obecne są składowe harmoniczne częstotliwości podstawowej 50 Hz, wówczas nie ma praktycznych możliwości wyeliminowania ich wpływu na sekwencje pojawiających się wyładowań niepełnych. Zarówno filtracja analogowa sygnałów pomiarowych, jak i metody cyfrowe - stosowane z powodzeniem w przypadku innych rodzajów zakłóceń (o charakterze wysokoczęstotliwościowym), są w takiej sytuacji zupełnie nieefektywne.

Odształcenie napięcia może być opisywane przez względne wartości poszczególnych harmonicznym oraz całkowity współczynnik odkształcenia *THD* definiowany jako stosunek wartości skutecznej harmonicznym do wartości skutecznej składowej podstawowej:

$$(1) \quad THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1}$$

gdzie:  $U_1$  – wartość skuteczna składowej podstawowej napięcia,  $U_i$  – wartość skuteczna kolejnej  $i$ -tej harmonicznej napięcia,  $n$  – liczba uwzględnianych harmonicznym (zwykle 25 lub 40). Dla wysokich i średnich napięć, zgodnie z rozporządzeniem Ministra Gospodarki z września 2000r. [13], „wartości współczynnika odkształcenia napięcia *THD* oraz zawartość poszczególnych harmonicznym odniesione do harmonicznej podstawowej nie mogą przekraczać:

- 1,5% i 1,0% dla sieci  $U_n > 110kV$
- 2,5% i 1,5% dla sieci  $30kV < U_n \leq 110kV$
- 5,0% i 3,0% dla sieci  $1kV < U_n \leq 30kV$

Oznacza to, że najintensywniejszemu oddziaływaniu harmonicznym napięcia mogą być poddawane układy izolacyjne średnich napięć do 30kV. Zgodnie z normą [2], dotyczącą pomiaru wyładowań niepełnych, dla określenia kształtu przemiennego napięcia probierczego należy je próbować z rozdzielczością nie mniejszą niż 8 bitów oraz z częstotliwością co najmniej 100 razy wyższą od

częstotliwości podstawowej. Przesunięcie fazowe pomiędzy wysokim napięciem probierczym, a rejestrowanym niskim napięciem (z dzielnika) powinno być mniejsze od  $5^\circ$ . Należy zauważyć, że wymagania stawiane przez tę normę pozwalają teoretycznie na wyznaczenie wartości harmonicznym aż do 50-tej tzn. do 2500Hz (dla  $f_1=50Hz$ ). W praktyce ten zakres jest niższy, a dodatkowo dla pełnej analizy harmonicznym należy wyznaczyć i uwzględnić charakterystykę amplitudowo-fazową dzielnika wysokiego napięcia – aż do najwyższej analizowanej częstotliwości.

### Żywiczne układy izolacyjne

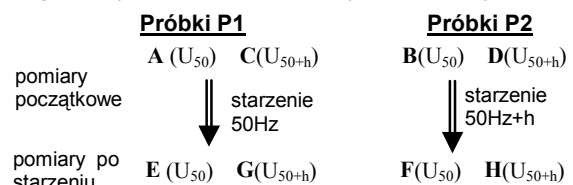
Układy izolacyjne na bazie żywicy epoksydowych są powszechnie stosowane w układach izolacyjnych, szczególnie średnich napięć np. przekładników prądowych i napięciowych. Aby zminimalizować wpływ wyładowań niepełnych już na etapie produkcji tych aparatów wprowadza się specjalne zalecenia dotyczące:

- kontroli procesu wytwarzania (faza zalewania, krzepnięcia), ścisłej kontroli parametrów procesu (temperatura, próżna, etc), oraz parametrów samej żywicy w celu zminimalizowania możliwości wystąpienia wtrącin gazowych,
- opracowania reguł projektowych minimalizujących natężenie pola elektrycznego w izolacji
- przeprowadzania zalewania z zastosowaniem gazu o większej wytrzymałości elektrycznej niż powietrze
- ograniczenia występowania zwiększonego natężenia pola przy elementach przewodzących

Źródła wyładowań niepełnych w izolacji żywicznej stanowią zatem mikrowtrąciny gazowe w objętości żywicy, inkluzje przylegające do uzwojeń, a także punktowe zanieczyszczenia i mikroostrza. Defekty w izolacji żywicznej stanowiące ośrodki rozwoju wyładowań niepełnych przedstawia się modelowym układem elektrod typu ostrze-płaszczyzna, z elektrodą ostrzową o promieniu  $r_k$  przy odległości  $a$  między elektrodami. Kryterium inicjowania wyładowań jest wówczas taka wartość natężenia pola elektrycznego, przy której powstają lokalne źródła ładunków.

### Zakres badań i stanowisko pomiarowe

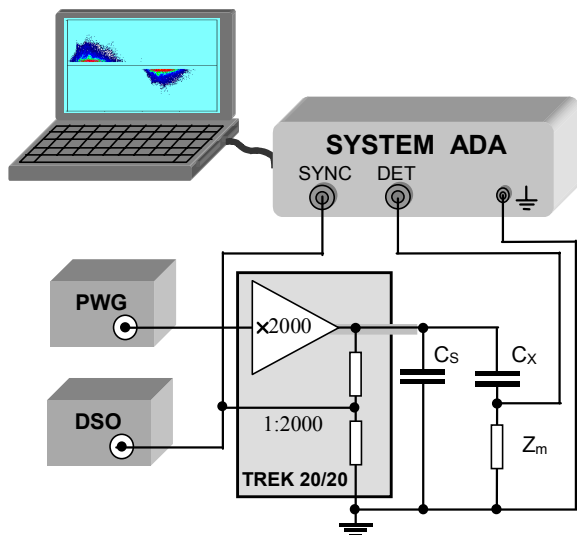
Celem badań była ocena skutków oddziaływania wyładowań niepełnych w próbkach żywicy epoksydowej stosowanej np. w przekładnikach średniego napięcia, poddanych długotrwałemu działaniu napięcia probierczego 50Hz oraz napięcia odkształconego przez harmoniczne. Pole elektryczne kształtowano w zatopionym w żywicy układzie elektrod ostrze-płaszczyzna o ustalonej geometrii ( $r_k=100\mu m$ ,  $a=10mm$ ). W badaniach starzeniowych w czasie 720 godzin zastosowano napięcia probiercze  $U_{50}$  o częstotliwości 50Hz (próbki P1) oraz odkształcone  $U_{50+h}$  ze składowymi  $U_{50}$  i  $U_n$  o częstotliwościach 50Hz i  $n*50Hz$  (próbki P2), przy czym wartości skuteczne napięć wynosiły: w pierwszym przypadku  $U_{50}=2U_0$  ( $U_0$  - napięcie początkowe wyładowań), w drugim  $U_{50}=1,99U_0$  i  $U_n=10\%*1,99U_0$ . Zawartość harmonicznym wynosiła zatem 10%, a przesunięcie fazowe  $\varphi=0^\circ$ . Przy zachowaniu stałej wartości skutecznej napięć:  $U_{50Hz}$  i napięcia odkształconego  $U_{50+h}$ , w drugim przypadku wartość maksymalna napięcia wzrosła.



Rys. 2. Program badań

Rejestrowano obrazy fazowe wyładowań, przy czym obrazy charakterystyczne dla procedury badań przy napięciu  $U_{50}$  i  $U_{50+h}$  oznaczono literami od A do H (Rys. 2).

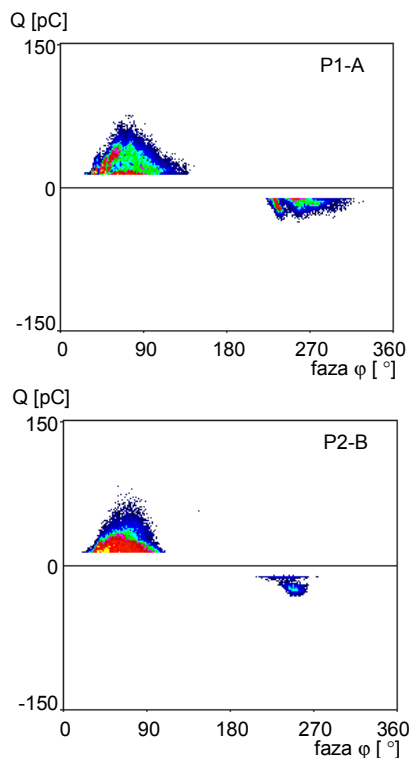
Stanowisko badawcze (rys.3) zawierało: sterowane źródło wysokiego napięcia – wzmacniacz wysoko-napięciowy TREK® typ 20/20B, programowany generator sygnałów PWG, system pomiaru wyładowań niezupelných ADA (Advanced Discharge Analyzer), rejestrujący ich obrazy fazowo-rozdzielcze oraz oscyloskop cyfrowy DSO.



Rys. 3. Konfiguracja stanowiska badawczego:  
 $C_x$  – pojemność badanego obiektu,  $C_s$  – pojemność sprzęgająca,  
 $Z_m$  – impedancja detekcyjna

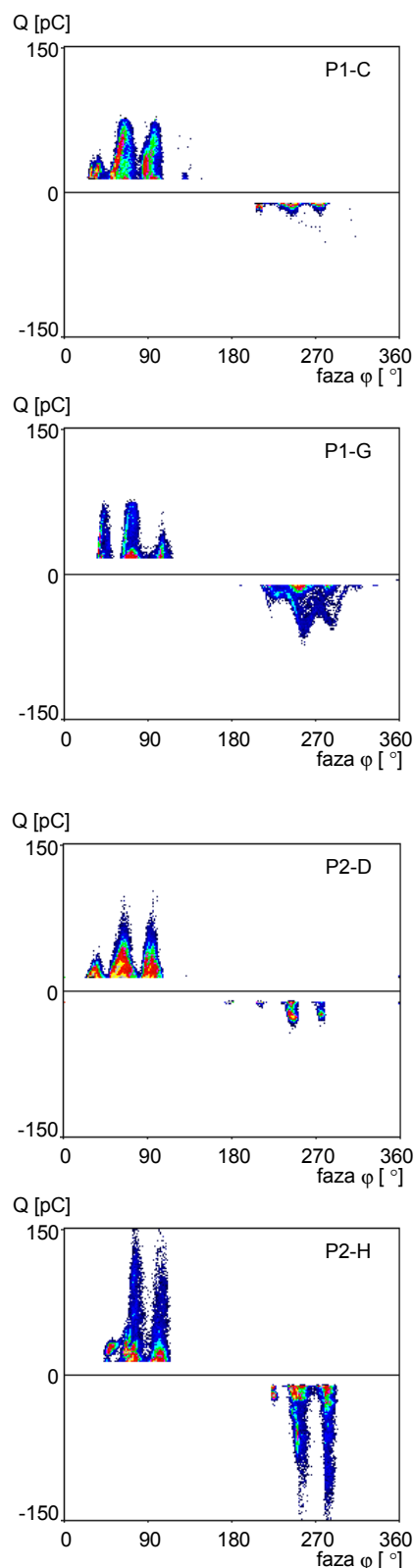
### Wyniki badań

Dla zilustrowania badań przedstawiono wyniki pomiarów z zastosowaniem 11-tej harmonicznej ( $U_{50}+U_{11h}$ ). Obrazy fazowe A, B reprezentują w przybliżeniu jednakowe formy wyładowań w próbkach P1 i P2.



Rys. 4. Obrazy fazowo-rozdzielcze (wstępne) wnz w modelowych próbkach żywicy epoksydowej: P1-A i P2-B

Jakościowa ocena procesów starzeniowych przy częstotliwości 50Hz i napięciu odkształconym odnosi się do zmian obrazów fazowych (Rys. 5), a ilościowa do wartości ich parametrów opisowych, takich jak: ładunek maksymalny  $Q_m$ , liczba wyładowań  $N$ , ładunek średni  $Q_{sr}$ , z uwzględnieniem biegunowości napięcia probierczego (Tabela 1).



Rys. 5. Obrazy fazowo-rozdzielcze wyładowań niezupelných przy napięciu odkształconym: P1 - starzenie napięciem  $U_{50}$ , P2- starzenie napięciem  $U_{50+11h}$  - C;D - początek próby, G,H- starzenie

Tabela. 1. Wybrane parametry opisujące wyładowania w próbkach

Parametr		Identyfikator próbki i pomiaru					
		P1-A	P2-B	P1-C	P2-D	P1-G	P2-H
N		647	618	1949	860	338	819
N <sup>+</sup>	[s <sup>-1</sup> ]	512	592	1183	728	185	416
N <sup>-</sup>		135	26	766	132	153	403
Q <sub>max</sub> <sup>+</sup>	[pC]	74	73	74	102	75	150
Q <sub>max</sub> <sup>-</sup>		38	34	53	45	74	150
Q <sub>sr</sub> <sup>+</sup>	[pC]	23	21	17	22	27	32
Q <sub>sr</sub> <sup>-</sup>		24	21	20	23	30	30
Q <sub>sr</sub>		18	23	13	20	22	33

## Wnioski

Porównanie efektów starzenia przy częstotliwości 50Hz i 50Hz+11h wskazuje na zmiany obrazów fazowych i zwiększenie wartości parametrów opisowych wyładowań przy napięciu odkształconym, co oznacza tworzenie się w dielektryku warunków dla rozwoju wyładowań niepełnych. Obecność harmonicznych napięcia probierczego jest bowiem dodatkowym, zewnętrznym czynnikiem, który determinuje warunki fizyczne rozwoju wyładowań niepełnych w ich źródłach. Zniekształcenie napięcia probierczego wpływa zarówno na jednostkowe jak i statystyczne parametry rejestrowanych wyładowań. Zmianie ulegają: liczba wyładowań w okresie, ładunki poszczególnych wyładowań i ich położenia fazowe, rozkłady amplitudowe i fazowe. Jest to efektem zmian gradientów i wartości napięcia będącego źródłem narażeń układu izolacyjnego. Skutek procesów starzeniowych ma zatem związek z kształtem napięcia probierczego. W odniesieniu do wpływu harmonicznych to będzie on tym większy im większy jest wpływ harmonicznych na zwiększenie wartości maksymalnej napięcia probierczego (jest to np. przypadek 5-tej harmonicznej,  $\varphi=0^\circ$ ) i/lub na zwiększenie liczby przedziałów fazowych, w których pochodna napięcia jest większa niż dla analogicznego przedziału przy 50Hz (t.j. np. przypadek 11-tej harmonicznej,  $\varphi=0$ ). Oczywiście zależy to również od współczynnika THD oraz od kąta przesunięcia fazowego harmonicznych w stosunku do napięcia o częstotliwości 50Hz.

Zmniejszenie lub wzrost prędkości zmian napięcia są ponadto określone występującą kombinacją poszczególnych harmonicznych, jak również ich amplitud i faz. Przykładowo, lokalne minimum w przebiegu napięcia probierczego może skutkować odpowiadającym mu fazowo zanikiem występowania wyładowań. Należy przy tym zauważyć, że podczas pomiaru, który może wynosić np. kilkadziesiąt czy też kilkaset sekund, poszczególne harmoniczne mogą zanikać lub pojawiać się, powodując akumulowaną fazowo modulację procesu generowania wyładowań. Uwzględnienie tego zjawiska jest szczególnie ważne w rzeczywistych pomiarach diagnostycznych oraz monitoringu wyładowań niepełnych [1]. Skutkiem oddziaływania harmonicznych napięcia probierczego jest ich wpływ na zachodzące w materiale układu izolacyjnego procesy starzeniowe. Są to procesy degradacji fizykochemicznej polimeru i powstawania fazy gazowej w styczności z dielektrykiem stałym i elektrodą, oraz inicjowania ładunków w głąb dielektryka. Na podstawie aktualnych badań można stwierdzić [14], że energia prądu emisji z elektrody jest wystarczająca do zapoczątkowania destrukcji wiązań nadcząsteczkowych w materiale stałym. Prąd ten podlega jednak ograniczającemu działaniu pola ładunku przestrzennego w nim formowanego. Wyładowania niepełne mogą powodować zatem zarówno erozję powierzchniową w otoczeniu elektrody, jak i odkładanie się produktów reakcji w postaci mikrokryształów. Obydwa

procesy mogą powodować lokalne wzmocnienie pola elektrycznego. Odkształcone napięcie probiercze, podobnie jak wzrost jego częstotliwości powodują przyspieszenie procesów starzeniowych. Efekty wpływu częstotliwości były badane np. w próbach oddziaływania wyładowań niepełnych na powierzchnię kompozytów i żywicy epoksydowych [15].

Badania prezentowane w referacie były częściowo dofinansowane przez Komitet Badań Naukowych w ramach projektu badań własnych nr: 10.10.120.430

## LITERATURA

- [1] Florkowska B., Florkowski M., Włodek R., Zydrón P., Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niepełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia, *Wyd. IPPT PAN*, 2001
- [2] IEC-60270 ed. 3, Partial discharge measurements, *IEC*, 2000
- [3] CIGRE Working Group D1.11, Knowledge rules for partial discharge diagnosis in service, *ELECTRA*, No. 207, pp. 63-66, April 2003
- [4] Florkowski M., Zniekształcenia harmoniczne wysokiego napięcia a obrazy wyładowań niepełnych, *Symposium EUI'97: Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia*, Zakopane, 1997, s.95-101
- [5] Florkowski M., Distortion of partial discharge images caused by high voltage harmonics, *Conf. Proc. 10<sup>th</sup> ISH*, Montreal, Canada, 1997
- [6] Florkowski M., Influence of high voltage harmonics on partial discharge patterns, *Conf. Proc. 5<sup>th</sup> ICPADM*, pp. 303-306, Seoul, Korea, 1997
- [7] Florkowski M., Zydrón P., Pomiary wyładowań niepełnych w diagnostyce silników wysokonapięciowych - wpływ zakłóceń i wyższych harmonicznych na pomiary i interpretację wyników, *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr 4/98, str. 230-237, Warszawa, 1998
- [8] Gross D.W., Fruth B.A., Distortion of phase resolved partial discharge pattern due to harmonics and saturation, *IEEE CEIDP 1998 Annual Report*, pp. 416-419, Atlanta Georgia, 1998
- [9] Florkowska B., Włodek R., Zydrón P., Numerical simulation of the influence of ac test voltage shape on phase distribution of partial discharge pulses, *Conf. Proc. of 43<sup>rd</sup> International Scientific Colloquium IWK'98*, Vol. 4, pp. 304-309, Technical University of Ilmenau, 1998
- [10] Montanari, G.C.; Fabiani, D.; Searching for the factors which affect self-healing capacitor degradation under non-sinusoidal voltage, *Trans. DEI*, vol. 6, no. 3. pp. 319-325, 1999
- [11] Montanari G.C., Fabiani D.; The effect of nonsinusoidal voltage on intrinsic aging of cable and capacitor insulating materials, *IEEE Trans. DEI*, vol. 6, no. 6. pp. 798-802, 1999
- [12] Kurihara T., Tsuru S., Imasaka K., Suehiro J., Hara M., PD characteristics in an air-filled void at room temperature under superimposed sinusoidal voltages, *IEEE Trans. DEI*, vol. 8, no. 2. pp. 269-275, 2001
- [13] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z 25.09.2000 r., *Dziennik Ustaw RP*, Nr 85/2000, poz. 957, § 32. 1.
- [14] Tanaka T., Space Charge Injected via Interfaces and Tree Initiation in Polymers, *IEEE Trans. on DEI*, Vol. 8, No. 5, pp. 733-743, 2001
- [15] Łaś T., Słowikowski J., Słowikowski J., Efekt działania wyładowań niepełnych na powierzchnię kompozytu i żywicy epoksydowej przy częstotliwościach 50...1000Hz w atmosferze powietrza, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. LXXVI, 4/2000, str. 94-96, Warszawa, 2000

**Autorzy:** dr hab. inż. Barbara Florkowska prof. AGH, dr inż. Paweł Zydrón, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: [beflor@agh.edu.pl](mailto:beflor@agh.edu.pl), [pzydron@agh.edu.pl](mailto:pzydron@agh.edu.pl), dr inż. Marek Florkowski, ABB Centrum Badawcze, ul. Strowińska 13a, 31-038 Kraków, E-mail: [marek.florkowski@pl.abb.com](mailto:marek.florkowski@pl.abb.com)