

## SKALOWANIE TORU POMIAROWEGO W BADANIACH UKŁADÓW IZOLACYJNYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA METODAMI DETEKCJI WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

Paweł ZYDRON, Józef ROEHRICH

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki

al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

tel: 012 6172886 fax: 012 6345721 e-mail: pzydron@agh.edu.pl, roehrich@agh.edu.pl

**Streszczenie:** Pomiarów wyładowań niezupełnych (wnz) są jedną z metod badania stanu układów izolacyjnych wysokiego napięcia. W referacie przedstawiono zagadnienia związane z procedurą skalowania toru pomiarowego wnz wraz z opisem aktualnych wymagań stawianych układom generatorów impulsów wzorcowych. W oparciu o normę międzynarodową IEC-60270 ed. 3 (2000-12) opisano metodę sprawdzania poprawności działania takich generatorów oraz zaprezentowano jej praktyczną realizację. Poruszono również problematykę pomiarów w zakresie bardzo wysokich częstotliwości, nieopisaną przez w/w normę.

Artykuł jest ilustrowany wynikami badań wykonanych w Laboratorium Wysokich Napięć Katedry Elektrotechniki i Elektroenergetyki AGH przy zastosowaniu wirtualnego przyrządu pomiarowego, w którym zastosowano szerokopasmowy oscyloskop cyfrowy z dedykowanym oprogramowaniem.

**Słowa kluczowe:** wyładowania niezupełne (wnz), ładunek pozorny, skalowanie.

### 1. OPIS PROBLEMU

#### 1.1. Wprowadzenie

Pomiary wyładowań niezupełnych są jedną z metod badania stanu układów izolacyjnych wysokiego napięcia [1]. Przy właściwym wykonaniu pozwalają na wykrywanie, identyfikację i lokalizację defektów obecnych w strukturach układów izolacyjnych różnych rodzajów urządzeń elektrycznych: kabli, transformatorów, maszyn wirujących itd. Pomiarów takie są wykonywane zarówno na etapie badań poprodukcyjnych, jak i w okresie eksploatacji urządzeń, jako jeden z elementów ich diagnostyki. W drugiej grupie wyróżnić można pomiary typu *on-line* – wykonywane na obiektach podczas ich normalnej pracy oraz pomiary typu *off-line* – prowadzone na obiektach wyłączonych z ruchu. W każdym z przypadków istotne znaczenie ma poprawne i zgodne z normami wykonanie badań, w tym stosowanie właściwego skalowania zarówno samych przyrządów, jak i całych torów pomiarowych [2,3,4].

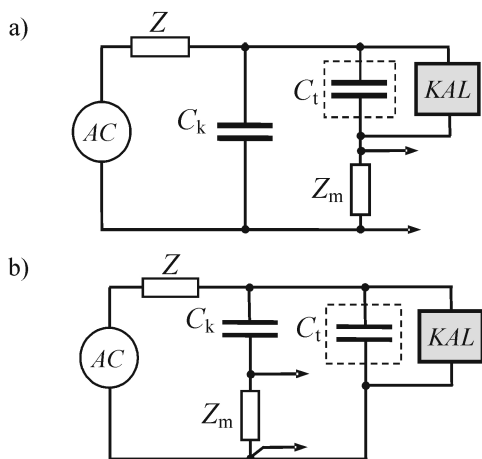
#### 1.2. Ładunek pozorny – problemy skalowania i pomiaru

Podstawową wielkością wyznaczaną podczas większości pomiarów wyładowań niezupełnych jest tzw. *ładunek pozorny* wyładowania. Odpowiada on ładunkowi,

który doprowadzony impulsowo do zacisków badanego obiektu spowodowałby identyczne wskazanie miernika wyładowań niezupełnych jak to wyładowanie. Wartości ładunków pozornych impulsów wyładowań są wyznaczane przede wszystkim na obiektach o stałych skupionych oraz – rzadziej – na obiektach o stałych rozłożonych. W drugim przypadku podstawowym utrudnieniem towarzyszącym pomiarom są występujące zjawiska falowe, a mierzoną wielkością jest wówczas często amplituda impulsu napięcia wywołanego wyładowaniem [5]. Wartość tego napięcia, rejestrowanego na zewnętrznych zaciskach urządzenia jest zależna nie tylko od jego pojemności elektrycznej i ładunku przeniesionego przez impuls wyładowania, ale również od: położenia defektu, długości drogi sygnału od jego źródła do miejsca pomiaru oraz transmisyjnych właściwości toru propagacji impulsu (tłumienie i rozmycie, dopasowanie impedancyjne, obecność punktów nieciągłości skutkujących występowaniem efektów odbicia). W takich sytuacjach konieczne jest stosowanie układów detekcyjnych o dużo szerszym paśmie przenoszenia aniżeli szerokość pasma detekcji układów określanych jako szerokopasmowe w normie IEC-60270 [2]. Tematyka ta jest poruszana w wielu obecnie prowadzonych badaniach dotyczących np. lokalizacji defektów w kablach [6, 7].

Problemy falowe występują we wszystkich obiektach, w których czas propagacji impulsu wyładowania do miejsca pomiaru jest wielokrotnie dłuższy od czasu trwania samego impulsu. W szczególny sposób uwidaczniają się one także w przypadku wykonywania badań w zakresach *UHF/VHF* w układach izolacyjnych typu *GIS* (*Gas Insulated Systems*) lub w maszynach wirujących, gdy czasy trwania pojedynczego impulsu są rzędu  $10^{-9}$  s. W pewnych przypadkach m.in. przy badaniu wyładowań niezupełnych powstających w układach izolacyjnych SN poddawanych działaniu napięć o dużych stromościach, wytwarzanych w układach przekształtnikowych ze sterownikami *PWM* (*Pulse Width Modulation*), pomiary wysokoczęstotliwościowe z zastosowaniem sond *UHF/VHF* są jedynym realnym sposobem detekcji wnz. Pomiarów tego typu nie są jednak definiowane przez normę IEC-60270, zaś szacowanie wartości ładunku pozornego jest wówczas utrudnione, a bardzo często nawet niemożliwe.

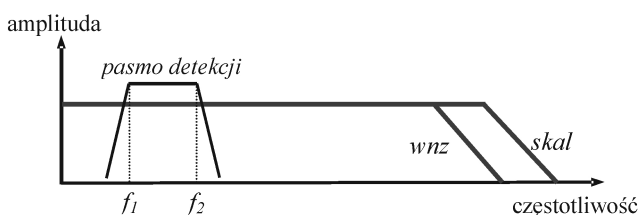
Należy zauważyć, że mierniki do pomiaru wyładowań niezupełnych nie są skalowane bezpośrednio w wartościach bezwzględnych ładunku, a każdy pomiar jest pomiarem porównawczym. Operacją, która umożliwia odniesienie wskazań miernika wyładowań niezupełnych w kompletnym układzie pomiarowym do znanych wartości ładunków wzorcowych jest skalowanie. Polega ono na podaniu ciągu krótkotrwałych impulsów prądowych, z układu skalującego zwanego kalibratorem przyłączanego równolegle do badanego obiektu, co dla dwóch klasycznych układów detekcji przedstawiono na rysunku 1. Poprawny sposób dołączenia generatora impulsów skalujących narzuca konieczność stosowania układów z niezależnym zasilaniem – najlepiej bateryjnym, pozwalającym na jego podłączenie na „pływającym” potencjale (rys. 1a).



Rys.1. Poprawny sposób podłączenia generatora impulsów skalujących w dwóch podstawowych układach detekcji wyładowań niezupełnych: a) szeregowym, b) równoległym (KAL – generator impulsów skalujących, AC – źródło napięcia probierczego,  $C_i$  – pojemność obiektu badanego,  $C_k$  – kondensator sprzęgający,  $Z_m$  – impedancja detekcyjna,  $Z$  – impedancja filtra separującego w.cz.)

### 1.3. Kalibratory ładunku pozornego - wymagania

W klasycznej metodzie pomiaru wyładowań niezupełnych, opisaną w normie IEC-60270 [2], dla wyznaczenia wielkości ładunku wyładowania wykorzystuje się szerokopasmowe właściwości generowanych przez nie impulsów. Układ detekcyjny stanowi obwód pasmowoprzepustowy o zalecanej szerokości pasma  $\Delta f$  od 100 do 400 kHz i górnej częstotliwości granicznej  $f_2$  nie większej niż 500 kHz, a więc wielokrotnie niższej od częstotliwości granicznej widma impulsów wyładowań. Można wykazać, że powstający na nim pod wpływem krótkiego impulsu ładunkowego przebieg napięciowy ma amplitudę proporcjonalną do wartości ładunku pozornego [1]. Impulsy skalujące wytwarzane przez kalibrator powinny być więc na tyle krótkie, aby górna częstotliwość graniczna ich widma była porównywalna z częstotliwością graniczną impulsów wyładowań (rys. 2).



Rys. 2. Zakres widm wyładowań niezupełnych (wnz) i impulsów skalujących (skal) względem pasma detekcji

Kalibratory wyładowań niezupełnych, czyli generatory krótkotrwałych impulsów ładunkowych są budowane jako generatory impulsów napięciowych wyposażone w możliwie niewielką, dołączoną szeregowo pojemność sprzęgającą  $C_0$ . Uzyskiwany na ich wyjściu ładunek  $q$  zależy od wartości tej pojemności oraz amplitudy impulsu napięcia  $U_0$ :

$$q = C_0 \cdot U_0 \quad (1)$$

W tabeli 1 przedstawiono wymagania [2] dotyczące głównych parametrów impulsów napięciowych stosowanych w kalibratorach do generacji impulsu ładunkowego.

Tabela 1. Wymagania dla impulsów skalujących (IEC-60270 [2])

Parametr	Wartość	Komentarz
czas narastania $t_r$	$t_r \leq 60 \text{ ns}$ dla $f_2 < 500 \text{ kHz}$ $t_r \leq \frac{0,03}{f_2}$ dla $f_2 > 500 \text{ kHz}$	$f_2$ - górna częstotliwość graniczna układu detekcji
kształt impulsu napięciowego	 poziom $H$ nie może się zmienić więcej niż o 5%	na wyjściu kalibratora impulsy dwóch biegunowości
	 $t_d > (1/f_1)$	1) na wyjściu kalibratora impulsy jednej biegunowości 2) $f_1$ - dolna częstotliwość graniczna układu detekcji

W zależności od kształtu przebiegu napięcia w generatorze na wyjściu układu skalującego mogą być wytwarzane impulsy ładunkowe mające jedną lub dwie polarność. W dotychczas stosowanych kalibratorach są to najczęściej dwa impulsy na okres napięcia probierczego tzn. 100/120 impulsów na sekundę.

Wartość ładunku przenieszonego przez impuls generowany przez kalibrator może być sprawdzona dwiema podstawowymi metodami: przez pomiar bezpośredni przy użyciu układu całkującego lub poprzez rejestrację impulsu prądowego na rezystorze o małej wartości ( $50 \Omega$  do  $200 \Omega$ ) i obliczenie pola jego powierzchni. W tym drugim przypadku ładunek  $q$ , odpowiadający scałkowanej w czasie wartości prądu jest określony wzorem:

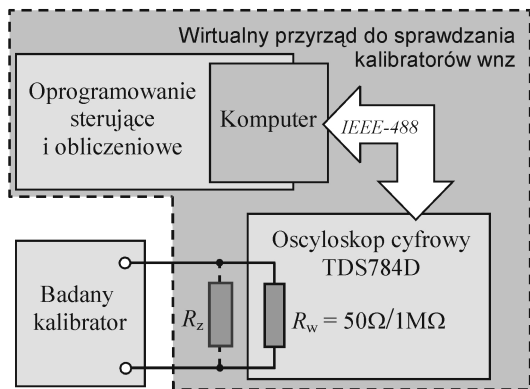
$$q = \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt = \frac{1}{R} \int_{t_1}^{t_2} u_R(t) dt \quad (2)$$

gdzie:  $R$  – wartość rezystancji rezystora,  $i(t)$  – rejestrowany prąd,  $u_R(t)$  – napięcie na rezystorze,  $t_1, t_2$  – umowne chwile początku i końca całkowania rejestrowanego sygnału.

## 2. PRAKTYCZNA REALIZACJA ZADANIA

### 2.1. Sprawdzenie kalibratora ładunku pozornego

Podczas wykonywania skalowania toru pomiarowego stanowiska do badania wyładowań niezupełnych w pierwszej kolejności dokonano sprawdzenia posiadanych generatorów ładunków skalujących.



Rys. 3. Schemat blokowy stanowiska do sprawdzania kalibratorów ładunku pozornego wyładowań niezupełnych

Stanowisko do badania kalibratorów ładunku (rys. 3) zawiera oscyloskop cyfrowy (*Tektronix TDS 784D*) sterowany poprzez interfejs IEEE-488 z komputera obsługującego cały proces sprawdzania [4]. Wśród istotnych składników/parametrów technicznych stanowiska wymienić można:

- szerokopasmowy rezystor pomiarowy 50 Ω (500MHz),
- pasmo oscyloskopu  $\Delta f = 200$  MHz,
- częstotliwość próbkowania 2GHz,
- rejestracja kształtu impulsów napięciowych metodą synchronicznego uśredniania – wynik jest średnią z co najmniej 10 rejestracji (zalecenie normy [2]).

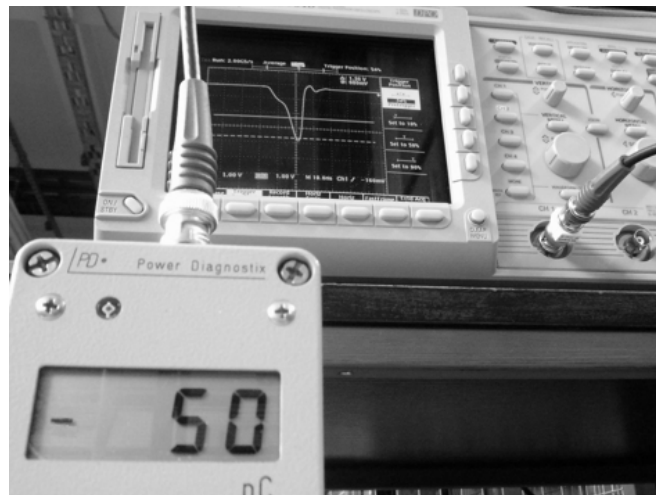
Zastosowanie oscyloskopu cyfrowego jako wielopunktowego synchronicznego układu uśredniającego pozwala na zwiększenie dokładności wyznaczenia wartości średniej ładunków produkowanych przez kalibrator oraz zwiększenie odstępu sygnał/szum, a więc wartości współczynnika SNR. Jest to szczególnie ważne podczas pomiaru bardzo małych wartości ładunku na poziomie pojedynczych pikokulombów. Teoretycznie, w przypadku eliminacji tą metodą szumów i zakłóceń niesynchronicznych poprawa wartości współczynnika SNR jest równa pierwiastkowi z całkowitej liczby wykonanych i uśrednionych rejestracji [8]. Ze względów praktycznych w opisywanym układzie stosuje się od 100 do 1000 uśrednień, a całkowity czas rejestracji dla typowych kalibratorów nie przekracza wówczas 20 sekund.

Uwzględniając parametry układu pomiarowego oraz rejestrowane sekwencje próbek sygnału, wartości ładunków  $q$  generowanych przez badane kalibratory są wyznaczone zgodnie ze wzorem:

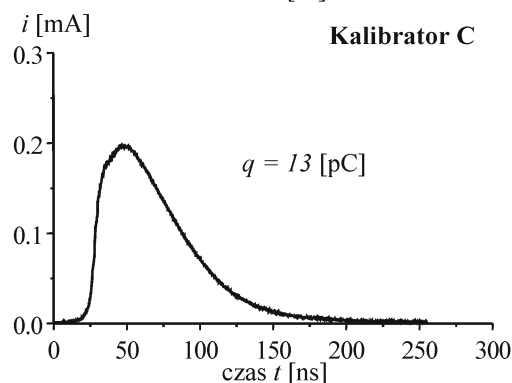
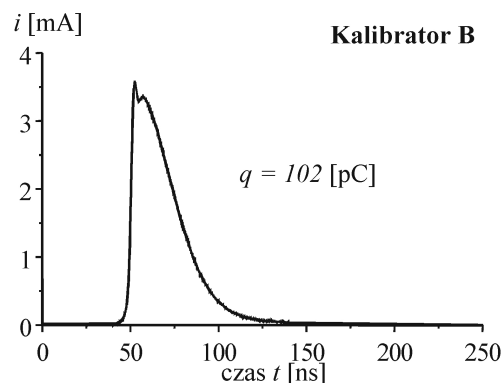
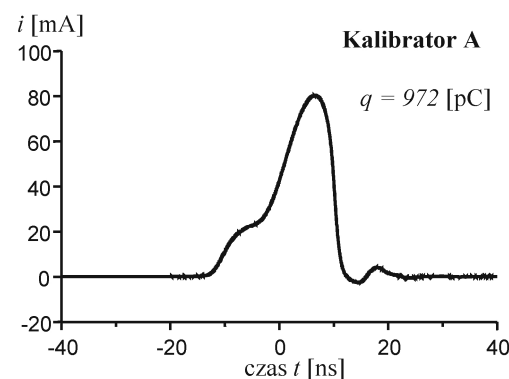
$$q \text{ [pC]} = \frac{1}{R \cdot f_s} \cdot \sum_{i=1}^N u_i = 10 \cdot \sum_{i=1}^N u_i \quad (3)$$

gdzie:  $R$  – rezystancja rezystora pomiarowego [ $\Omega$ ],  $f_s$  – częstotliwość próbkowania [Hz],  $u_i$  – wartość próbki napięcia [V],  $N$  – liczba analizowanych próbek.

Zdjęcie na rysunku 4 przedstawia rejestrację oscyloskopową ładunku  $-50\text{pC}$  wykonaną podczas sprawdzania jednego z kalibratorów ładunku pozornego. Na rysunku 5 przedstawiono zarejestrowane i odpowiednio przeskalowane impulsy prądowe uzyskane podczas sprawdzania trzech różnych kalibratorów (A, B, C). Analiza tych wyników pozwala na określenie wielkości produkowanych przez nie ładunków oraz ocenę ich parametrów czasowych. Kalibrator A wytwarza impulsy o najkrótszym czasie trwania, a kalibrator C o najdłuższym.



Rys. 4. Rejestracja oscyloskopowa impulsu prądowego o ujemnej polarności i ładunku całkowitym 50pC

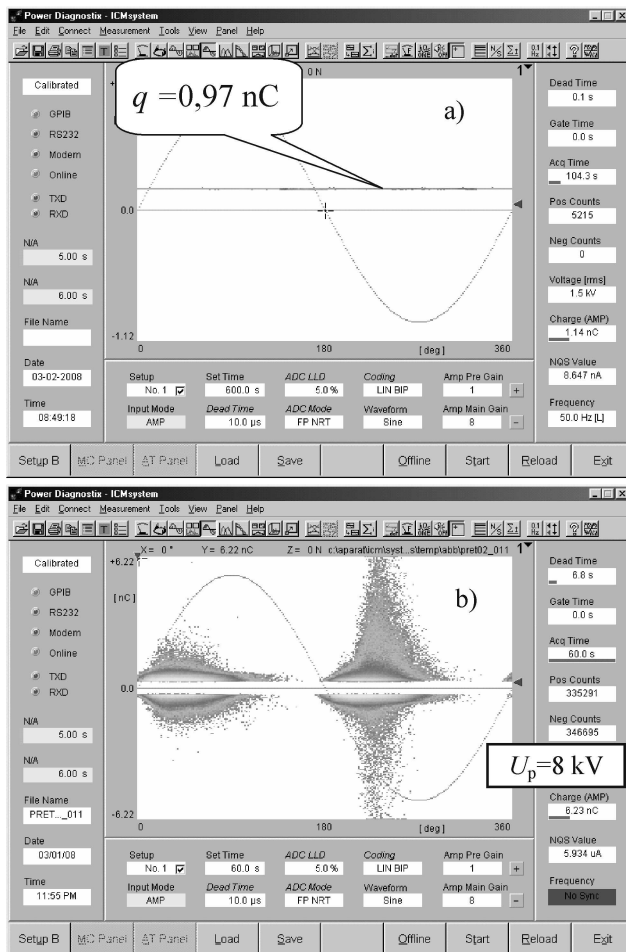


Rys. 5. Przykładowe impulsy prądu płynącego przez rezystor  $R = 50\Omega$  wytwarzane przez trzy różne kalibratory ładunku pozornego

Odniesienie wyników do wymagań zawartych w tabeli 1 wskazuje na to, że kalibrator C nie spełnia wymagań stawianych obecnie generatorom ładunków skalujących.

## 2.2. Skalowanie kompletnego toru pomiarowego

Podczas wykonywania skalowania kompletnego toru pomiarowego stanowiska do badania układów izolacyjnych wysokiego napięcia metodą pomiaru wyładowań niezupełnych stosowano układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 1b. Obiektem badanym był fragment pręta stojana maszyny elektrycznej z izolacją termoutwardzalną. Po podłączeniu kalibratora na zaciski obiektu podano serię impulsów skalujących o ładunku  $0,97\text{nC}$  i dokonano ich rejestracji w systemie pomiarowym w czasie  $60\text{ s}$ . Wynik tej rejestracji w postaci obrazu fazowo-rozdzielczego typu  $\varphi$ - $q$ - $n$  przedstawiono na rysunku 6a. Rysunek 6b przedstawia wynik pomiaru wyładowań niezupełnych występujących w izolacji pręta przy napięciu probierczym  $8\text{ kV}$ .



Rys. 6. Obraz ekranu systemu pomiarowego dla:  
a) kalibracji toru pomiarowego, b) pomiarów wnz w izolacji termoutwardzalnej pręta stojana silnika SN przy napięciu probierczym  $8\text{ kV}$

## 3. PODSUMOWANIE

Współczesne, cyfrowe, sterowane komputerowo urządzenia i systemy pomiarowe do pomiaru wyładowań niezupełnych pozwalają na wygodne i efektywne prowadzenie badań układów izolacyjnych wysokiego napięcia. Artykuł odnosi się do problemu skalowania toru pomiarowego wnz z uwzględnieniem wymagań normy IEC-60270 [2]. Dokument ten dotyczy jednak jedynie pomiarów klasycznych z zastosowaniem detekcji pasmowej w stosunkowo niskich zakresach częstotliwości. Dla pomiarów w zakresach częstotliwości *UHF/VHF* praktycznie nie ma możliwości dokładnego określenia wielkości ładunku pozornego wyładowania, a tematyka ta jest lub ma być przedmiotem innych uregulowań. Zaprezentowana praktyczna realizację stanowiska do sprawdzania kalibratorów ładunku pozornego umożliwia weryfikację poprawności ich działania oraz wyznaczenie rzeczywistych wartości generowanych impulsów ładunkowych.

## 4. BIBLIOGRAFIA

1. 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
2. IEC-60270: High-Voltage Test Techniques - Partial Discharge Measurements, ed.3 (2000-12)
3. IEEE Standard PC37.301/D3-R1, Draft Standard High Voltage (above 1000 V) Tests Techniques - Partial Discharges Measurements, Feb 2008
4. Zydrón P., Badanie kalibratorów ładunku pozornego wyładowań niezupełnych, Materiały VIII Sympozjum-EUI'01, str. 473-478, Zakopane, 2001
5. Stone, G.C.: Partial discharge XXV: Calibration of PD measurements for motor and generator windings-why it can't be done, IEEE El. Insul. Mag., Vol. 14, No.1, pp.9-12, 1998
6. Jim Jun Guo, Lili Zhang, Chunchuan Xu, Boggs S.A., High frequency attenuation in transmission class solid dielectric cable, IEEE Trans on Power Delivery, Vol. 23, No. 4, pp. 1713-1719, 2008
7. Tozzi M., Montanari C., Cavallini A., PD detection limits in extruded power cables through wide and ultra-wide bandwidth detectors, IEEE Trans. on Dielect. and Electr. Insulation, vol. 15, no. 4, pp.1183-1189, 2008
8. Beauchamp K.G., Przetwarzanie sygnałów metodami analogowymi i cyfrowymi, WNT, Warszawa, 1978

Badania były współfinansowane z projektu badawczego rozwojowego nr N R01 0019 04

## CALIBRATION OF MEASUREMENT SETUP FOR HIGH VOLTAGE INSULATION SYSTEMS INVESTIGATION BY MEANS OF PARTIAL DISCHARGE DETECTION

**Keywords:** partial discharges, apparent charge, calibration

Paper presents subject of partial discharge measurements calibration accordingly to requirements of international standard IEC60270-2000 [2]. Problems with apparent charge evaluation for measurements in *UHF/VHF* range are pointed out. Measuring digital system for testing of PD calibrators meeting IEC standard requirements is shortly presented and results of laboratory tests of three different calibrators and whole PD measurement system are also described.