

Tomasz Kalicki*, Adam Maćkowiak*, Hanna Mościcka-Grzesiak*

WYŁADOWANIA NIEZUPEŁNE PRZY NAPIĘCIU STAŁYM

Streszczenie: W pracy przedstawiono rekonesansowe wyniki badań wyładowań niezupełnych przy napięciu stałym. Obiektem badań był dielektryk stały uwarstwiony szeregowo z wtrąciną gazową. Analizie poddane zostały odstępy czasowe pomiędzy kolejnymi impulsami wyładowań niezupełnych w zależności od stałej czasowej ładowania pojemności wtrąciny.

Słowa kluczowe: wyładowania niezupełne, napięcie stałe

1. Wprowadzenie

Napięcie stałe ma dużo dłuższy zyciorys niż napięcie przemiennie. Odkrycia, które dokonali Galvani, Volta, Oersted, Ohm i Ampere dotyczyły napięcia stałego i stały się bazą dla późniejszego rozwoju nauki o elektryczności.

Pierwsza stacja energetyczna napięcia stałego 110 V została zbudowana przez Edisona w Nowym Yorku w 1882 r. Energia elektryczna w tej stacji była wytwarzana przez generator napędzany silnikiem parowym. Kilka lat później powstały setki takich stacji. Na przykład w Niemczech w 1887 r. było 375 stacji energetycznych, z czego 170 w Berlinie. Ze zrozumiałych względów stacje te były lokowane bardzo blisko odbiorców.

Pojawienie się napięcia przemiennego było przyczyną długich dyskusji o zaletach i wadach każdego systemu. Dopiero wprowadzenie napięcia przemiennego trójfazowego odsunęło napięcie stałe praktycznie na margines. Było ono używane tylko w trakcji i w przemysłowych procesach elektrolizy [1].

Rozwój układów izolacyjnych napięcia przemiennego wyrażający się między innymi wzrostem napięcia znamionowego linii i urządzeń oraz wzrostem mocy jednostek,

* Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki

oprócz oczywistego postępu technicznego, stwarza ogromne ryzyko. Naturalnie postępujący proces starzenia wielkich i drogich jednostek wymusił na inżynierach wypracowanie niemal perfekcyjnych metod diagnostyki i monitoringu układów izolacyjnych napięcia przemiennego.

Napięcie stałe po „latach niebytu” w elektroenergetyce powróciło w 1954 r., kiedy to oddano do użytku pierwszy podmorski kabel wysokiego napięcia stałego (HVDC) łączący szwedzką wyspę Gotland z lądem. W następnych latach kładziono liczne kolejne linie kablowe HVDC o napięciu sięgającym 500 kV. Rozwój urządzeń energetycznych wysokiego napięcia stałego wymusza odpowiednią diagnostykę i systemy badań.

Napięcie stałe ma bardzo istotne znaczenie też w dziedzinie tzw. nieenergetycznych zastosowań. Historycznie ujmując należy wymienić w kolejności telegraf, filtry elektrostatyczne, a następnie wszelkie urządzenia generujące strumień elektronów (mikroskopia elektronowa, spektroskopia, rentgenoskopia). W przeszłości układy izolacyjne tych urządzeń nie stwarzały większych problemów. Dziś pojawia się tendencja budowania zminiaturyzowanych, tanich i absolutnie pewnych urządzeń tego typu. Wymaga to oczywiście odpowiednich badań i diagnostyki.

Wyładowania niepełne przy napięciu przemiennym mają jednoznacznie negatywną rolę w degradacji materiału izolacyjnego prowadzącej do przebicia. Z drugiej strony te same wyładowania są cennym nośnikiem informacji o stanie układu izolacyjnego. W oparciu o analizę parametrów wyładowań niepełnych powstały wyrafinowane metody diagnostyki i identyfikacji defektów [2, 3, 4, 5].

Diagnostyka układów izolacyjnych napięcia stałego dopiero wchodzi na warsztat w nielicznych jednostkach badawczych. Pionierska rola w tym względzie przypada uniwersytetowi w Delft [6, 7, 8, 9].

2. Wyładowania niepełne przy napięciu stałym

Jednym z częstszych defektów układu izolacyjnego jest wtrącina gazowa w dielektryku stałym. Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie wtrącinę gazową oraz równoważny schemat zastępczy. Symbole C_a i R_a reprezentują zdrową część izolacji, C_b i R_b reprezentują część izolacji szeregowo usytuowanej względem wtrąciny, C_c jest pojemnością wtrąciny, a R_c jest powierzchniową rezystancją wtrąciny, S oznacza przerwę iskrową.

Przy napięciu stałym rozkład napięcia jest rezystancyjny i zależy w stanie ustalonym od rezystancji R_b i R_c . Stała czasowa układu τ wyraża się wzorem:

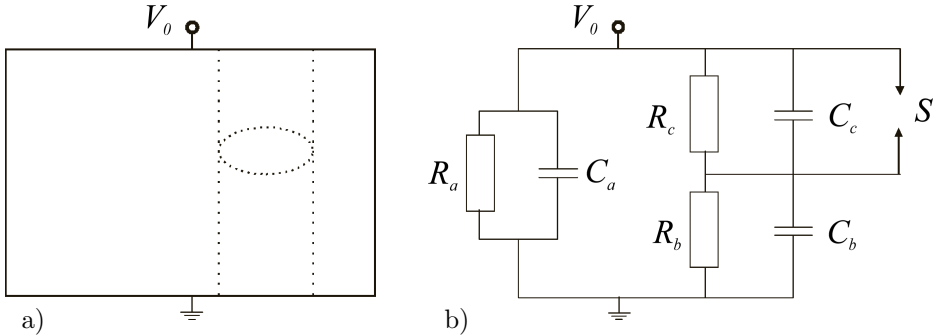
$$\tau = \frac{R_b R_c (C_b + C_c)}{R_b + R_c} \quad (1)$$

Gdy w procesie ładowania pojemności wtrąciny C_c napięcie osiągnie wartość przeskoku U_p , wówczas we wtrącinie wystąpi wyładowanie, a napięcie na wtrącinie u_1 w bardzo krótkim czasie zmaleje do wartości U_g , przy którym wyładowanie gaśnie (rys. 2) [10]. Po zgaśnięciu wyładowania napięcie na wtrącinie znów wzrasta w sposób wykładniczy wg wzoru:

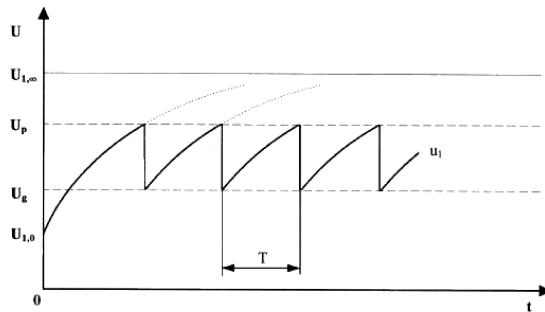
$$u_1 = U_{1,\infty} - (U_{1,\infty} - U_g) e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (2)$$

po pewnym czasie napięcie u_1 ponownie osiągnie wartość U_p i wystąpi kolejne wyładowanie. Proces ten będzie się powtarzał cyklicznie, a czas Δt między następującymi po sobie wyładowaniami będzie:

$$\Delta t = \tau \ln \frac{U_{1,\infty} - U_g}{U_{1,\infty} - U_p}. \quad (3)$$



Rys. 1. Model (a) i schemat zastępczy (b) układu izolacyjnego z wtrąciną gazową [1]



Rys. 2. Przebieg napięcia na wtrącinie gazowej [10]

Częstość powtarzania wyładowań z kolei wyraża wzór:

$$n = \frac{1}{\tau \ln \frac{U_{1,\infty} - U_g}{U_{1,\infty} - U_p}}. \quad (4)$$

Stała czasowa ładowania układu z wtrąciną gazową, w zależności od wartości R_b i R_c , mieści się w bardzo szerokim przedziale kilku rzędów wielkości, przeważnie do 1000s. Zmieniając w planowy sposób pojemność i rezystancję powierzchniową modelowej wtrąciny gazowej można oczekiwać wyraźnych zmian czasu Δt między kolejnymi wyładowaniami.

3. Cel i zakres pracy

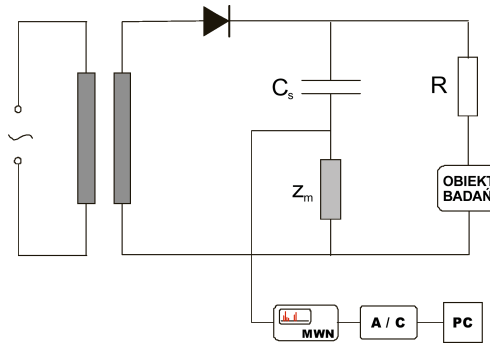
Celem nadrzędnym podjętych prac było stworzenie warsztatu badawczego pozwalającego na pomiary i analizę wyładowań niezupełnych przy napięciu stałym.

Obiektem badań w pierwszej fazie był układ modelowy o wyładowaniach wewnętrznych, innymi słowy dielektryk stały szeregowo uwarstwiony z wtrąciną gazową. Obiekt taki pozwala na ocenę odstępów czasowych między kolejnymi impulsami prądowymi wyładowań niezupełnych w zależności od stałej czasowej ładowania pojemności wtrąciny. Odstępy czasowe kolejnych wyładowań są bardzo ważnym parametrem charakteryzującym wyładowania niezupełne przy napięciu stałym, stąd taki wybór obiektu dla celów oceny możliwości układu pomiarowego.

Warsztat badawczy służący pomiarom i analizie statystycznej wyładowań niezupełnych przy napięciu stałym może być wykorzystywany do oceny zagrożenia wynikającego z faktu pojawienia się wyładowań niezupełnych w układach izolacyjnych napięcia stałego, ale również do celów diagnostycznych stopnia degradacji materiału, która wystąpiła z różnych powodów w układzie izolacyjnym napięcia przemiennego.

4. Układ pomiarowy

Układ do pomiaru wyładowań niezupełnych przy napięciu stałym pokazuje rysunek 3.



Rys. 3. Układ do pomiaru wyładowań niezupełnych przy napięciu stałym

Elementami przeznaczonymi do analizy wyładowań niezupełnych były tutaj:

- MIERNIK WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH (MWN) — w którym impulsy prądowe generowane w badanym obiekcie po wzmocnieniu i scałkowaniu formowane były w unormowane impulsy napięciowe o amplitudzie proporcjonalnej do wartości ładunku mierzonych impulsów prądowych,
- KARTA PRZETWORNIKA A/C — która czytała sygnał z MWN z częstotliwością do 330 kHz; rozdzielczość przetwornika wynosiła 12 bitów,
- PC — komputer Pentium II 300 MHz.

Sterowanie pomiarami oraz ich analiza odbywały się z poziomu komputera przy pomocy dwóch programów. Pierwszym z nich był program do akwizycji danych przy pomocy karty przetwornika A/C [11]. Umożliwiał on rejestrację wszystkich impulsów o amplitudzie wyższej od zadanego poziomu wyzwalania (poziomu szumów). Program zapisywał amplitudę mierzonych impulsów oraz czas ich wystąpienia z dokładnością do $10 \mu\text{s}$. Drugi program [12] po przetworzeniu danych wynikowych z karty A/C umożliwiał:

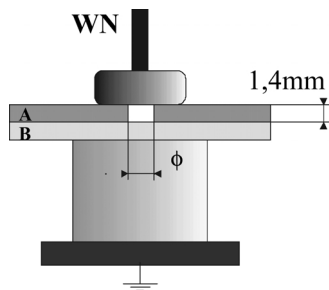
- obliczenie statystycznych parametrów charakterystycznych dla danej serii pomiarowej,
- tworzenie rozkładów częstościowych odstępów czasowych,
- tworzenie trójwymiarowych rozkładów impulsów wyladowań niezupełnych w funkcji ładunku i odstępów czasowych.

Zestawienie parametrów układu pomiarowego pokazano poniżej.

Max. częstotliwość próbkowania:	330 kHz
Rozdzielczość przetwornika A/C:	12 bitów (-2048;+2048)
Minimalny, możliwy do zarejestrowania odstęp czasowy:	$10 \mu\text{s}$
Max. odstęp czasowy:	bez ograniczeń
Max. liczba zarejestrowanych impulsów:	4000
Poziom wyzwalania:	dowolny

5. Obiekt badań

Obiekt badań przedstawiony na rysunku 4 zawierał wtrącinę powietrzną uwarstwioną szeregowo z dielektrykiem stałym. Krążki A i B wykonano z polimetakrylanu metylu. Wtrącina z jednej strony ograniczona była dielektrykiem stałym, z drugiej natomiast bezpośrednio przylegała elektroda wysokonapięciowa. Wtrącina miała kształt walca o wysokości 1,4 mm i średnicy 3, 4, 6 mm. Geometria obiektu badań zapewniała duże napięcie przeskoku wymagane ze względu na bezpieczeństwo układu pomiarowego, a jednocześnie przy napięciu ok. 20 kV rozpoczynały się wyladowania niezupełne.



Rys. 4. Obiekt badań

Założono, że zmiana średnicy wtrąciny, a więc jej pojemności spowoduje zmianę stałej czasowej ładowania układu i oczekiwaną zmianę odstępów czasowych Δt między kolejnymi wyladowaniami.

6. Wyniki i analiza badań

Na rysunku 5 przedstawiono zbiory punktów pomiarowych, którym przyporządkowano ładunek Q przenoszony przez impuls wyładowania niezupełnego i odstęp czasowy Δt względem poprzedniego wyładowania. Liczbę punktów o takich samych współrzędnych charakteryzuje odpowiedni kolor na wydruku barwnym.

Jeśli prześledzimy zbiory odpowiadające biegunowości dodatniej, to zauważymy, że wraz z powiększaniem średnicy wtrąciny (3, 4, 6 mm) następuje przesuwanie maksymalnych odstępów czasowych o ok. 1 rząd (0,1; 1; 10 s). Przy biegunowości ujemnej również następuje powiększanie odstępów czasowych, chociaż o mniejszą wartość. Dla średnicy wtrąciny 3, 4, 6 mm maksymalne odstępów czasowe wynoszą odpowiednio ok. 0,05; 0,1 i 0,5 s. Wszystkie pomiary wykonywano przy napięciu 30 kV. Przyjęto zasadę, że każdy zbiór liczył zawsze 4000 punktów pomiarowych. Czasy akwizycji danych wynosiły od 11,1 s dla wtrąciny o średnicy 3 mm przy biegunowości ujemnej, aż do 367,5 s dla wtrąciny o średnicy 6 mm przy biegunowości dodatniej.

Na rysunku 6 z kolei pokazano rozkłady częstościowe odstępów czasowych między kolejnymi wyładowaniami we wtrącinie gazowej. Rysunek ten dotyczy tych samych wyników pomiarowych co rysunek 5. Maksimum rozkładu odpowiada najbardziej prawdopodobnemu odstępowi czasowemu. Widać bardzo wyraźną tendencję, zgodną z oczekiwaniami. Pomniejszaniu średnicy wtrąciny, a więc jej pojemności i stałej czasowej, towarzyszy wyraźne skracanie odstępów czasowych.

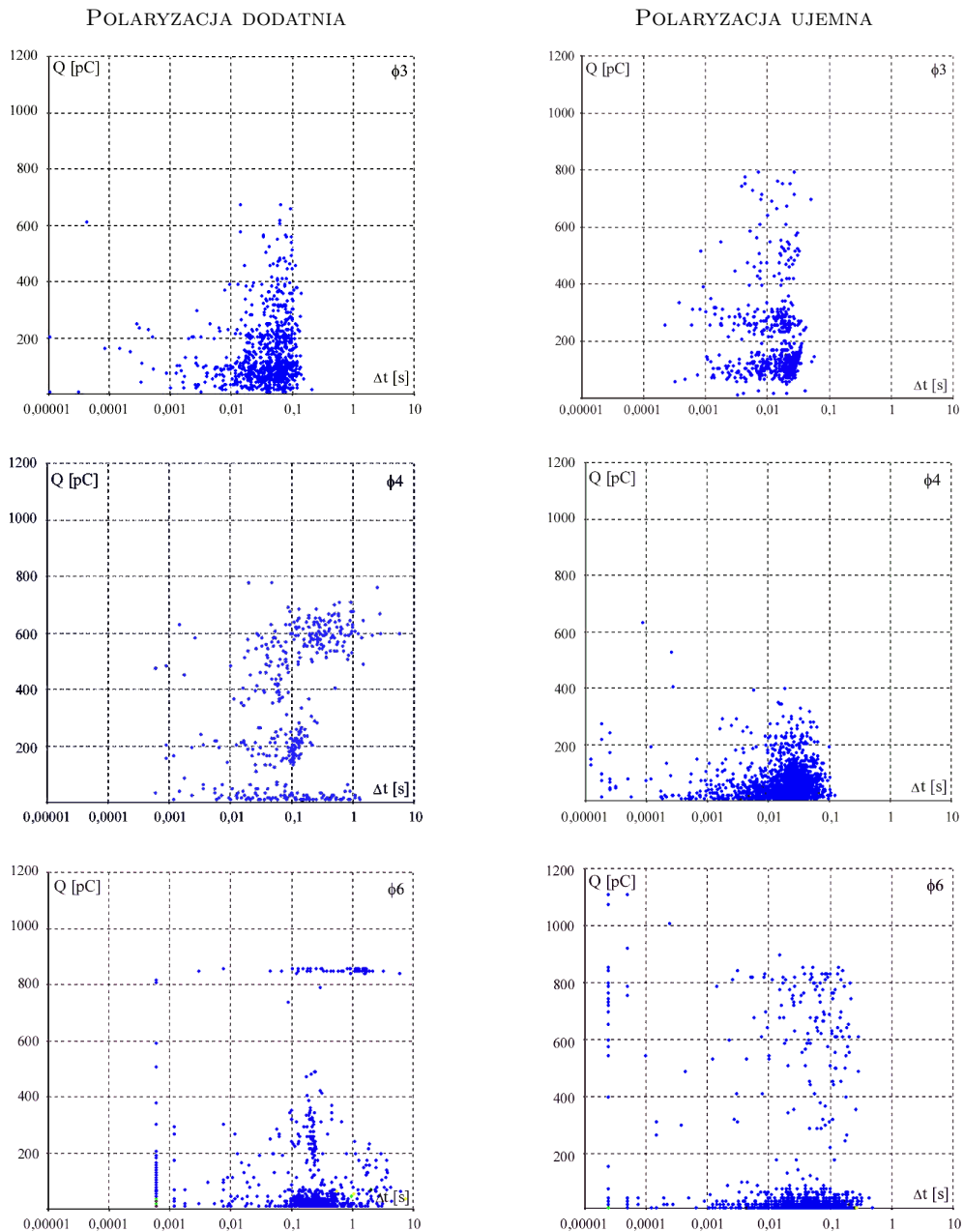
Kolejny rysunek 7 pokazuje diagramy procentowej zawartości liczby wyładowań w przedziałach odstępów czasowych. Można w ten sposób ilościowo ocenić odstępów czasowe wyładowań dla obu biegunowości.

7. Wnioski

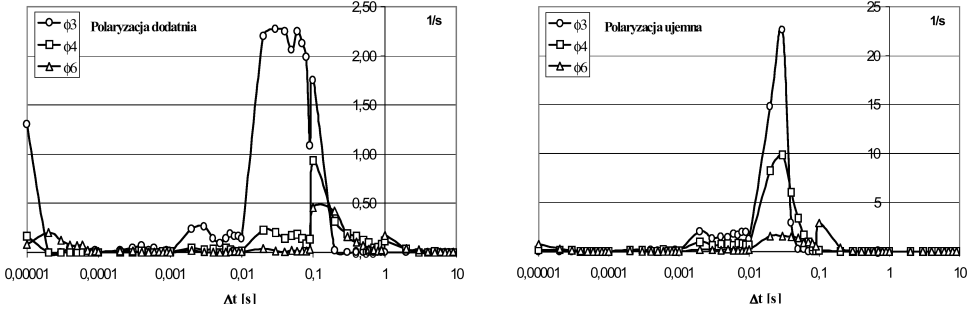
Wymiary wtrąciny gazowej, utożsamiane z jej pojemnością i stałą czasową, wyraźnie wpływają na odstępów czasowe między wyładowaniami niezupełnymi przy napięciu stałym.

Przy stałej wysokości wtrąciny gazowej równej 1,4 mm i średnicy o wymiarach 3, 4, 6 mm maksymalne odstępów czasowe wyładowań równe są odpowiednio 0,1; 1 i 10 s przy biegunowości dodatniej oraz ok. 0,05; 0,1 i 0,5 s przy biegunowości ujemnej. Najbardziej prawdopodobne odstępów czasowe między wyładowaniami rosną zgodnie ze wzrostem średnicy wtrąciny przy obu biegunowościach napięcia. Przy biegunowości dodatniej odstępów czasowe są o ok. 1 rząd wielkości większe niż przy napięciu ujemnym.

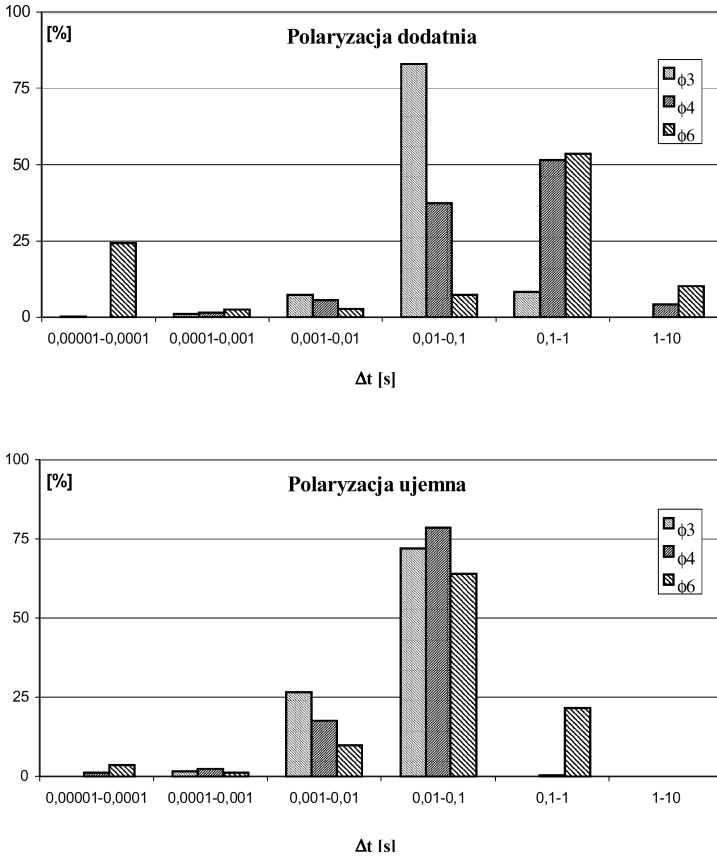
Zależność odstępów czasowych wyładowań od stałej czasowej ładowania wtrąciny planuje się w przyszłości wykorzystać jako kryterium diagnostyczne materiału.



Rys. 5. Zbiory punktów pomiarowych z przyporządkowanymi wartościami ładunku przenieszonego przez impuls wyladowania we wtrącinie gazowej oraz wartościami odstępu czasowego względem poprzedniego wyladowania; napięcie stałe 30 kV, 4000 punktów pomiarowych



Rys. 6. Rozkłady częstościowe odstępów czasowych między kolejnymi wyładowaniami we wtrącinie gazowej; napięcie stałe 30 kV



Rys. 7. Diagramy procentowej zawartości liczby wyładowań w przedziałach odstępów czasowych

Literatura

- [1] **Fromm U.:** *Partial Discharges and Breakdown Testing at High DC Voltage*, Delft University of Technology, 1995
- [2] **Florkowska B.:** *Analiza mechanizmów wyladowań niezupełnych w układach elektroizolacyjnych wysokiego napięcia*, Wydawnictwa AGH, Kraków 1995
- [3] **Florkowska B., Włodek R.:** *Pulse Height Analysis of Partial Discharges in Air*, IEEE Trans. on El. Insul., 1993, vol. EI-28, no 6, pp. 932–940
- [4] **Włodek R.:** *Mechanizmy działania wyladowań niezupełnych w dielektrykach*, PWN, Warszawa 1992
- [5] **Kalicki T., Morańda H., Mościcka-Grzesiak H., Ziomek W.:** *Identification of Defects in an Extinguishing Chamber of a Vacuum Interrupter*, 10 Symposium on HV Engineering, Montreal, Quebec, Canada, August 25–29, 1997
- [6] **Gulski E., Kreuger F. H.:** *Computer-Aided Registration of Discharge Patterns*, 7 International Symposium on HV Engineering, Vol. 7, article 71.01, Dresden, August 26–30, 1991
- [7] **Gulski E., Kreuger F. H.:** *Recognition of Discharges Sources Using Statistical Tools*, 3 International Conference of Properties and Applications of Dielectrical Materials, Tokyo, Japan, July 8–12, 1991
- [8] **Kreuger F. H., Gulski E., Krivda A.:** *Classification of Partial Discharges*, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 28, pp. 917–930, 1993
- [9] **Krivda A., Halen S.:** *Recognition of Partial Discharges in Generators*, HV 97, Montreal, Canada, August 25–29, 1997
- [10] **Dobroszewski R.:** *Badanie wyladowań niezupełnych przy napięciu stałym*, opracowanie w ramach projektu KBN 101/10T/97/13, Poznań, grudzień 1997
- [11] **Maćkowiak A.:** *Wykorzystanie karty przetwornika analogowo-cyfrowego do pomiaru wyladowań niezupełnych przy napięciu stałym i przemiennym*, 1998 r., opracowanie w ramach projektu KBN 101/T10/97/13
- [12] **Kalicki T., Maćkowiak A.:** *Cyfrowa analiza wyladowań niezupełnych przy wysokim napięciu stałym*, 1999 r., opracowanie w ramach projektu KBN 101/T10/97/13

PARTIAL DISCHARGES UNDER DC VOLTAGE

Paper presents preliminary results of partial discharge investigations obtained with DC voltage. The test object was solid dielectric material containing internal air void. The analysis was done for time intervals between successive impulses of partial discharges in dependance on time constant of void capacity charging.

Praca wykonana została w ramach projektu KBN 101/10T/97/13