

Mgr inż. Ryszard Zybert
Instytut Transformatorów, Maszyn
i Aparatów Elektrycznych
Politechnika Łódzka

W SPRAWIE BADAŃ DEGRADACJI DIELEKTRYKÓW WYWOŁANEJ
DZIAŁANIEM WYŁADÓWAŃ NIEZUPEŁNYCH

1. Wstęp

Potrzebę badań nad zjawiskiem wyładowań niezupełnych w urządzeniach wysokiego napięcia potęguje fakt budowy tych urządzeń na coraz to wyższe napięcia znamionowe. Badania te ogólnie można podzielić na dwa kierunki:

1. Badania modelowe mające wyjaśnić zjawisko od strony fizycznej oraz ustalić zależność między wskaźnikami reprezentującymi intensywność wyładowań niezupełnych, a ich destrukcyjnym działaniem na izolację.

2. Ustalenie metod pomiarowych, które pozwoliłyby na rejestrację wskaźników intensywności wyładowań niezupełnych w urządzeniach wysokiego napięcia.

Badania modelowe przeprowadza się na izolacji papierowo-olejowej, jak i syntetycznej.

Zagadnieniem wpływu wyładowań niezupełnych na izolację papierowo-olejową zaczęto zajmować się już kilkadziesiąt lat temu. Złożoność samej izolacji oraz wpływ wielu parametrów na jej własności spowodowały, że problem ten jest jeszcze niestety nadal w fazie eksperymentów i spekulacji naukowych. Niektóre z eksperymentów [1] wykazały, że dużej intensywności wyładowań niezupełnych nie musi towarzyszyć krótki czas do przebicia. Według tegoż autora można wyodrębnić dwa rodzaje wyładowań, a mianowicie - wyładowania ślizgo-

we związane z dużym wskaźnikiem ich intensywności - bardziej bezpieczne niż drugi rodzaj wyładowań, które są skoncentrowane w niewielu punktach przy ostrej krawędzi elektrody. Wyładowania te powodują lokalną erozję i prowadzą do przebicia w stosunkowo krótkim czasie mimo, że towarzyszy im mały wskaźnik intensywności /ładunek pozorny/. Stwierdzono także [2, 3], że wyładowaniem prowadzącym do przebicia izolacji towarzyszy dość silne wydzielanie się gazu podczas tych wyładowań.

Wyniki dotychczasowych badań w różnych laboratoriach wyraźnie wskazują na potrzebę pomiarów nie tylko wskaźników elektrycznych wyładowań niezupełnych, ale także produktów rozpadu izolacji papierowo-olejowych takich jak H_2 , CO czy CO_2 .

2. Cel badań, wybór układów i metod pomiarowych.

Celem podjętych badań w Instytucie Transformatorów, Maszyn i Aparatów Elektrycznych Politechniki Łódzkiej jest ustalenie zależności pomiędzy naprężeniami występującymi w izolacji papierowo-olejowej pracującej w transformatorach, poziomem wyładowań niezupełnych a intensywnością jej starzenia. Pozwoli to na ustalenie dopuszczalnego poziomu wyładowań niezupełnych, przy których gwarantowany jest jeszcze stosunkowo długi okres życia wspomnianej izolacji.

W pierwszej fazie badań, które zostały przeprowadzone, dokonano wstępnego rozpoznania problematyki pomiarów i wyboru odpowiednich układów pomiarowych. Wszystkie badania tej fazy mają charakter jakościowy a nie ilościowy.

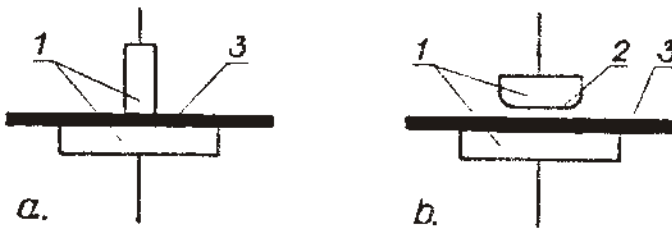
Na podstawie studiów literatury postanowiono:

1. Dokonywać pomiarów w komórce probierczej umożliwiającej analizę chromatograficzną gazowych produktów rozpadu izolacji papierowo-olejowej pod wpływem wyładowań niezupełnych.

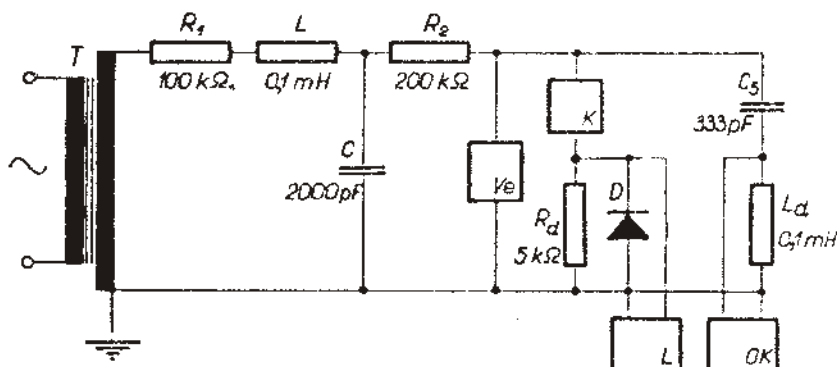
2. Badania przeprowadzać w układach modelowych pokazanych na rys.1.

3. Przeprowadzać pomiar ilości impulsów wyładowań niezupełnych oraz widma amplitudowego tych impulsów w układzie pokazanym na rys.2.

4. Mierzyć ilość wydzielającego się wodoru w wyniku degradacji izolacji pod wpływem działania wyładowań niezupełnych.



Rys.1. Układy modelowe do badania wpływu wyładowań niezupełnych na izolację papierowo-olejową
 1 - elektrody 2 - szczelina gazowa
 3 - próbka badana.



Rys.2. Układ do pomiaru elektrycznych wskaźników intensywności wylądowań niezupełnych.

V_e - woltomierz elektrostatyczny

K - komórka probiercza, D - dioda

L - licznik impulsów lub analizator amplitudy

OK - oscylograf o czułości 0,05 V/cm.

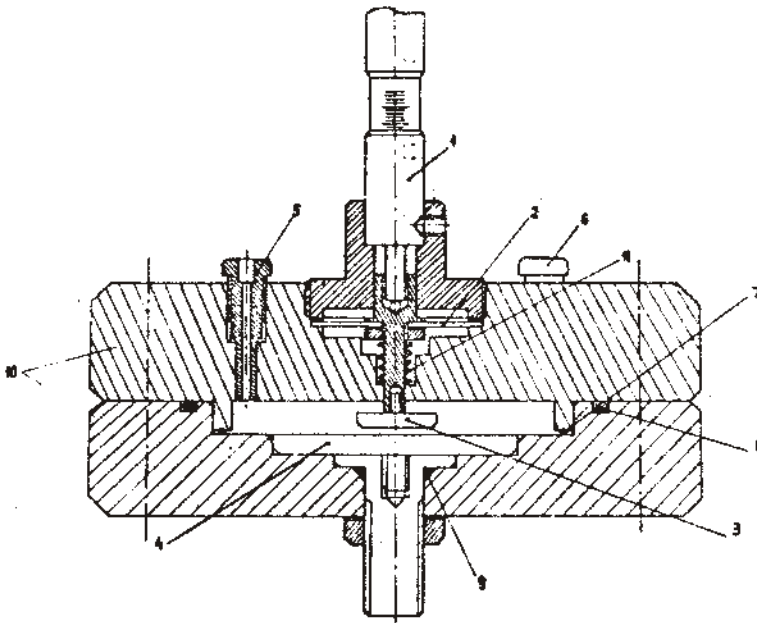
3. Układ pomiarowy

Opierając się na rozwiązaniach francuskich, zaprojektowano i wykonano komórkę probierczą pokazaną na rys.3. Jako materiału użyto polimetakrylenu metylu. Tak wykonana komórka probiercza zapewnia dużą szczelność, możliwość dokładnej regulacji odstępów elektrod, ich wymianę oraz przepływ gazu nośnego transportującego gazowe produkty rozpadu izolacji do chromatografu.

Do pomiaru ilości impulsów użyto przelicznika elektronicznego FEL-5, a do pomiaru widma amplitudowego analizatora amplitudy impulsów SA-1. Mierzono tylko impulsy dodatnie.

Pomiar ilości wydzielającego się wodoru w wyniku oddziaływania wylądowań niezupełnych na próbkę izolacji przeprowadzono w układzie

podanym na rys.4. Do pomiaru użyto chromatografu gazowego f-my Willy Griede /NRD/ z detektorem termoprzewodnościowym, który przystosowano do oznaczania próbek gazowych. Jako gazu nośnego użyto azotu, co zdeterminowało atmosferę komórki probierczej.

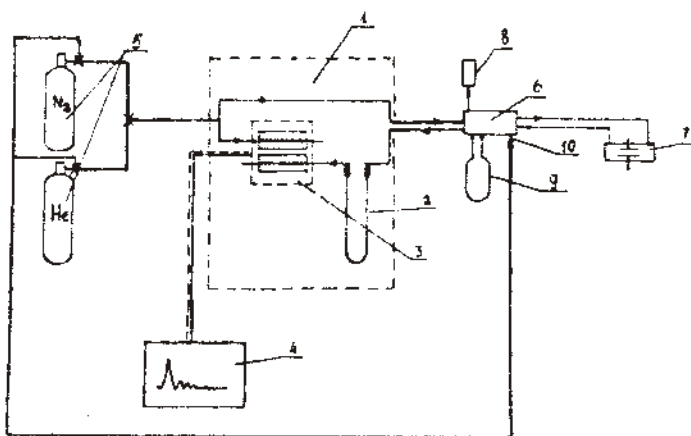


Rys.3. Komórka probiercza do badania izolacji papier-olej
 1 - śruba mikrometryczna, 2 - membrana,
 3,4 - elektrody, 5 - wlot gazu nośnego,
 6 - wylot gazu nośnego, 8,9 - uszczelnienia,
 10 - obudowa, 11 - sprężyna

Tok postępowania podczas oznaczania ilości wydzielanego wodoru był następujący:

- przedmuchano komórkę probierczą azotem
- poddano próbki ekspozycji wyładowań niezupelných

- wprowadzono próbę wodoru za pomocą zaworu wieloczynnościowego i dozownika gazu do kolumny chromatograficznej.



Rys.4. Układ do pomiaru ilości wodoru wydzielającego się z próbki w wyniku działania na nią wyładowań niezupełnych

1 - chromatograf gazowy, 2 - kolumna rozdzielcza, 3 - katarometr, 4 - samopis, 5 - butle z gazem nośnym, 6 - zawór wieloczynnościowy, 7 - komórka probiercza, 8 - pompa próżniową olejową do odpowietrzania dozownika 9, 9 - dozownik badanego gazu /pętla probiercza/, 10 - przedmuch gazem nośnym komórki probierczej.

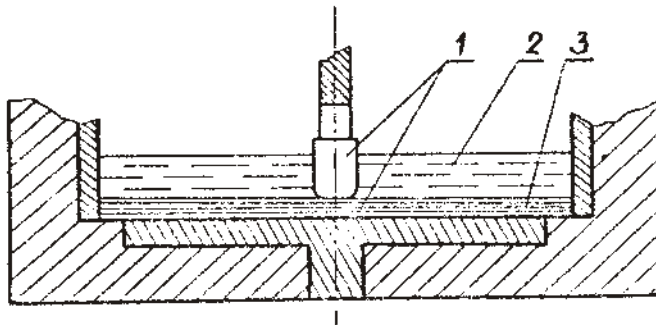
4. Przygotowanie próbek.

Papier izolacyjny w postaci próbek o grubości 60 μ i średnicy 90 mm był impregnowany u wytwórcy transformatorów, a następnie przesyłany w szczelnie zamkniętych pojemnikach. Pojemniki te były otwie-

rane tylko na czas wyjmowania papieru bezpośrednio przed próbą.

5. Przeprowadzone badania

Pierwsze badania dokonano w układzie modelowym pokazanym na rys. 1a. Górna elektroda została wykonana w myśl zaleceń międzynarodowych [4], w kształcie walca o średnicy 6 mm, promień zaokrąglenia dolnych krawędzi wynosił 1 mm. Próbkę stanowiło 6 warstw papieru izolacyjnego impregnowanego. Ponad powierzchnią próbki w komórce probierczej nie było oleju. Następnie w układzie, jak na rys.2, mierzono napięcie początkowe wyładowań niezupełnych oraz napięcie przebiccia. Uprzednio sprawdzono, czy układ jest wolny od wyładowań niezupełnych przy odłączonej komórce probierczej. Celem tego pomiaru było stwierdzenie, czy wystąpi powtarzalność napięcia początkowego wyładowań niezupełnych oraz napięcia przebiccia. Przeprowadzony eksperyment wykazał, że rozrzut wyników jest tak duży, że zastosowany układ modelowy nie nadaje się do dalszych badań. Postanowiono więc komórkę probierczą wypełnić olejem, rys.5.



Rys.5. Układ modelowy do badania wpływu wyładowań powierzchniowych na izolację papierowo-olejową
1 - elektrody, 2 - olej, 3 - próbka badana.

Wartość średnia napięcia początkowego wyładowań niezupełnych $/U_j/$ z 10 pomiarów wynosiła 14 kV, a największe odchylenie od wartości średniej 0,5 kV. Napięcie przebicia natomiast wynosiło 21 kV, a największe odchylenie od wartości średniej 2 kV. Uznano więc, że do dalszych badań wpływu wyładowań powierzchniowych na izolację papierowo-olejową należy przyjąć układ modelowy z rys.5.

W układzie tym dokonano dla kilku próbek pomiaru czasu życia w funkcji napięcia. Okazało się, że czas ten zaczyna gwałtownie maleć, jeśli zaczynają pojawiać się wyładowania niezupełne. Należy jednak sprawdzić, czy występują one także przy napięciu niższym niż U_j zwiększając czułość układu pomiarowego.

Zwiększenie czułości układu pomiarowego jak i przeprowadzenie badań statystycznych pozwoli na ujęcie ilościowe zależności czasu życia od napięcia w tym układzie, co będzie pomocne przy prognozowaniu czasu życia izolacji papierowo-olejowej narażonej na wyładowania powierzchniowe.

Badania nad degradacją izolacji w wyniku wyładowań niezupełnych zwanych wewnętrznymi, które występują w kawernach gazowych przylegających do papieru izolacyjnego wewnątrz transformatora przeprowadzono w układzie modelowym pokazanym na rys.1b. Średnica elektrody górnej wynosiła 20 mm, promień zaokrąglenia krawędzi 2,5 mm. Elektroda dolna o średnicy 60 mm. Próbką składała się z 3 warstw papieru izolacyjnego impregnowanego, szczelina powietrzna wynosiła 1 mm.

Napięcie przyłożone na zaciskach komórki probierczej - 5 kV. Zapewniało to liczbę impulsów wyładowań niezupełnych około 50 000 imp/min. Przeprowadzone próby wykazały, że w miarę upływu czasu zmienia się amplituda jak i ilość impulsów. Uległa zmniejszeniu przede wszystkim ilość impulsów o małym ładunku $/q < 500 \text{ pC}/$. W okresie poprzedzającym przebicie badanej próbki $/\text{po czasie ok. 2 godzin}/$ stwierdzono prawie zupełny zanik impulsów o wartościach stosunkowo małych, obserwowanych

na początku badania i pojawienie się niewielkiej ilości /kilkadziesiąt do kilkuset na minutę/ impulsów o ładunku rzędu 10^5 pC. Tę prawidłowość stwierdzono na kilku próbkach. Przy tym eksperymencie wykonano pomiar ilości wydzielającego się wodoru.



Rys.6. Chromatogramy analizy wodoru w komórce probierczej.

Chromatogramy zamieszczone na rys.6. Rys.6a przedstawia wynik pomiaru ilości wodoru, który wydzielili się w pierwszej godzinie badania, a więc kiedy było dużo impulsów o małym ładunku. Natomiast rys.6b przedstawia wynik analizy ilości wodoru po drugiej godzinie kiedy ilość impulsów o małym ładunku znacznie zmalała, a występowały impulsy o dużym ładunku. Widzimy tutaj zbieżność z obserwacjami autorów [1, 2, 3].

Oględziny próbek wykazały wysuszenie próbki w obrębie górnej elektrody i wyraźne ślady wyładowań na powierzchni papieru. Należy więc sądzić, że wyładowania wewnętrzne między górną elektrodą a papierem przechodziły w wyładowania ślizgowe na jego powierzchni. Z dotychczas przeprowadzonych prób nie udało się wyjaśnić zjawiska zanikania małych impulsów i pojawiania się nielicznych impulsów o bardzo dużej amplitudzie. Należy wykonać jeszcze szereg badań

z wyżej omawianym układem modelowym, aby stwierdzić czy nadaje się on do dalszych badań czy też należałoby znaleźć jakiś inny układ odwzorowujący układ rzeczywisty, w którym zachodzą wyładowania wewnętrzne.

6. Izolacja syntetyczna.

Dla wielu urządzeń wysokiego napięcia izolacją przyszłości w kraju, a dnia dzisiejszego w krajach bardziej rozwiniętych, jest izolacja syntetyczna. Do najpopularniejszych organicznych materiałów izolacyjnych należą: polistyren, histopen, polichlorek winylu /PCW/, polietylen itd. Zwrócenie uwagi na te materiały przez konstruktorów urządzeń wysokich napięć powoduje fakt, że posiadają one wysoką wytrzymałość dielektryczną, często niską wartość współczynnika strat dielektrycznych nawet przy bardzo dużych częstotliwościach, dużą oporność skrośną i powierzchniową. Z innych własności należy wymienić niewchłanianie wilgoci i odporność na działanie czynników chemicznych. Nie są one jednak wolne od wad: stosunkowo wysoka cena, większość z nich jest źle zwilżana przez olej, mają stosunkowo niską temperaturę mięknięcia, poza tym są bardzo wrażliwe na wyładowania niezupełne. Aby zmniejszyć możliwość powstawania wyładowań niezupełnych w kondensatorach stosuje się izolację trójwarstwową [5] : olej-papier-folia syntetyczna. Zastosowanie takiego rozwiązania pozwoliło na zmniejszenie gabarytów kondensatorów, a więc zwiększenie jednostkowego wskaźnika mocy, zmniejszenie stratności dielektrycznej oraz zwiększenie niezawodności pracy.

Jeśli chodzi o kable z izolacją syntetyczną, to jak podaje [6] , w r.1963 zainstalowano kabel z tą izolacją na napięcie 138 kV. Dzisiaj najprawdopodobniej pułap stosowanych napięć znamionowych znacznie się podniósł.

Jedynie w transformatorach folia syntetyczna nie jest jeszcze konkurentem dla izolacji papier-olej, ale i tutaj trwają próby wprowadzenia takich rozwiązań konstrukcyjnych, które umożliwiłyby jej stosowanie.

Niestety, prace zagraniczne nad stosowaniem izolacji syntetycznej nie znajdują właściwego odbicia w kraju. Zarówno produkcja folii syntetycznych, jak i prace nad jej zastosowaniem są daleko w tyle za podobnymi badaniami prowadzonymi w ZSRR, USA czy Francji. Prace te powinny iść w trzech kierunkach:

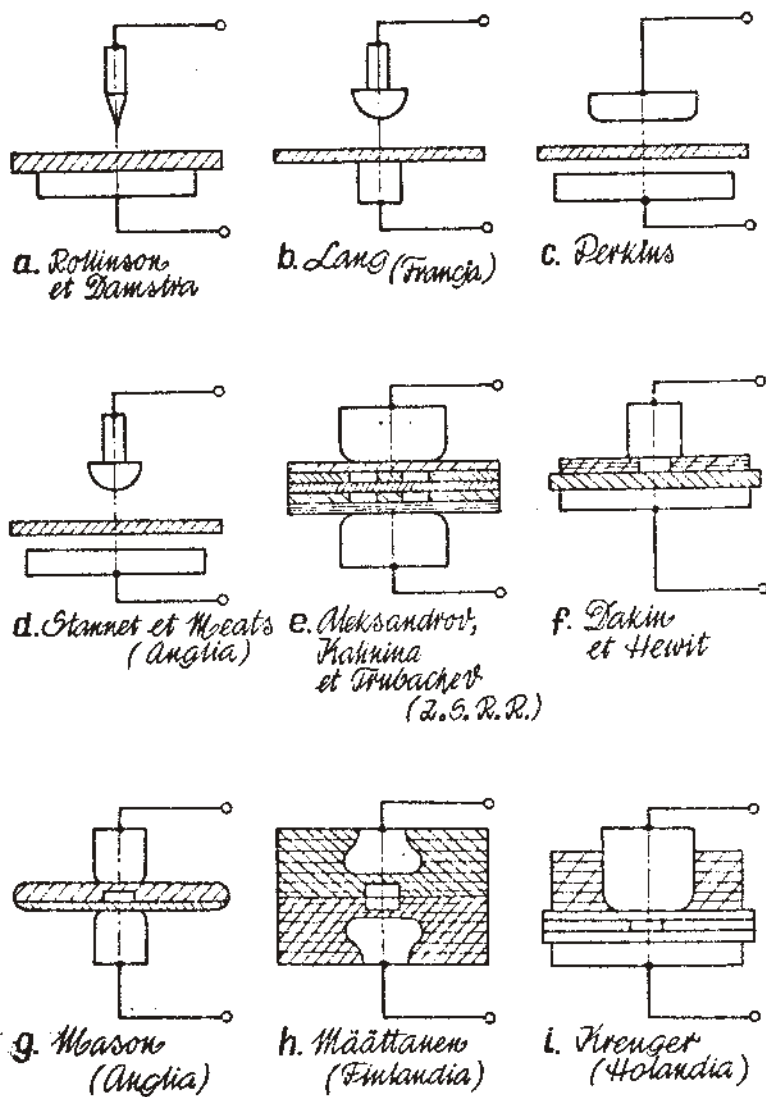
1. technologicznym - wytwarzanie folii o coraz to lepszych parametrach dielektrycznych jak i mechanicznych,
2. konstruktorskim - szukanie takich rozwiązań, które zapewniłyby bardzo małe narażenie folii na działanie wyładowań niezupełnych,
3. diagnostycznym - opracowanie metod pomiarowych pozwalających na ocenę wrażliwości różnego rodzaju folii syntetycznych na wyładowania niezupełne oraz pozwalających na określenie dopuszczalnych poziomów wyładowań niezupełnych, przy których zapewniona jest prawidłowa praca tych folii w układach izolacyjnych.

Mimo wielu prac nad ustaleniem odporności folii syntetycznych na wyładowania niezupełne wydaje się, że do tej chwili nie ustalono jeszcze zadawalających kryteriów oceny, ani nie opracowano odpowiednich układów, w których można by dokonać tej oceny. Proponowane kryteria wymagają jeszcze wielu eksperymentów, które potwierdziłyby ich prawdziwość. Należy podkreślić, że największą trudność sprawiają wyładowania niezupełne zwane wewnętrznymi.

Odnosnie badań wyładowań powierzchniowych została zaproponowana przez CEJ Komisję Nr.15 [4] metoda statystyczna, która być może od strony układu modelowego rozwiąże ten problem.

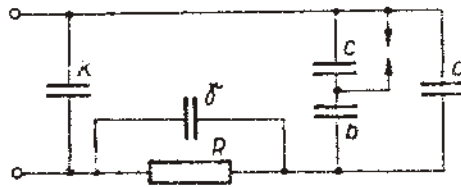
Jeśli chodzi o wyładowania wewnętrzne istnieje szereg propozycji układów modelowych. Pokazano je na rys.7. We wszystkich układach, w których kawerna gazowa występuje między warstwami izolacji, trudno będzie dokonać pomiaru produktów gazowych rozpadu izolacji pod wpływem wyładowań niezupełnych. Natomiast w układach typu e, f, g, h, i

badanie ich byłoby ułatwione, ale nie ma odwzorowania wpływu ścianek bocznych na procesy zachodzące w kawernie gazowej.



Rys.7. Układy modelowe do badania degradacji izolacji pod wpływem wyładowań wewnętrznych.

Porównanie tych dwóch typów układów przez pomiar krzywych życia próbek przy tym samym natężeniu pola w próbce oraz tej samej intensywności wyładowań może wyjaśnić jak dalece zjawiska zachodzące w obu układach są różne. Osobnym zagadnieniem jest schemat zastępczy, którym posługujemy się przy rozważaniach teoretycznych nad zjawiskami elektrycznymi zachodzącymi przy wyładowaniach wewnętrznych w komórce probierczej. Schemat taki, przy układzie modelowym jak na rys.1b, zaproponowany przez badaczy francuskich, pokazany jest na rys.8.

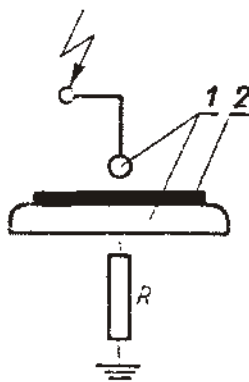


Rys.8. Schemat zastępczy komórki probierczej z jedną warstwą gazową.

- C - pojemność warstwy gazowej objętej wyładowaniem
- b - pojemność dielektryku połączona szeregowo z warstwą gazu objętą wyładowaniem
- a - pojemność pozostałej części układu
- K - pojemność układu zasilającego
- δ - pojemność wejściowa układu detekcyjnego
- R - opornik detekcyjny.

Badania wykonane w układzie pokazanym na rys.9 przy zasilaniu układu napięciem impulsowym wykazały występowanie figur Lichtenberga na powierzchni dielektryku. Te silnie zjonizowane obszary można z pewnym uproszczeniem traktować jako elektrody przewodzące, które podczas trwania wyładowania zmieniają się w czasie będąc połączone z górną elektrodą kanałem wyładowania. Tak więc schemat zastępczy komórki probierczej podany na rys.8 staje pod znakiem zapytania co do nie-

zmienności pojemności tego układu, a szczególnie pojemności C i b .



Rys.9. Schemat układu modelowego, w którym rejestrowano figury Lichtenberga.

1 - elektrody, 2 - próbka, R - opornik detekcyjny.

Dokonanie dodatkowych badań potwierdzających wyżej przedstawione spostrzeżenie może doprowadzić do przedstawienia odmiennego schematu zastępczego niż to podano na rys.8.

Przedstawione wnioski z przeprowadzonych badań muszą znaleźć potwierdzenie w dalszych eksperymentach oraz przyjąć postać liczbowych zależności, które pozwoliłyby na osiągnięcie celu wytyczonego w chwili podjęcia badań.

Literatura

1. Moser H.F. - Problematyka suszenia i wyładowań niezupełnych w transformatorach. II Konferencja Transformatorowa Łódź 1976
2. Bui An., Lacoste R., Guyotand A., Geland J. - Etude de phenomene de decharges partielles. Rev.General d'Electr.1971,nr.3.

3. Moraru D., Popesco C., Stoica M., Tanasescu Fl. - Detection des degradations produites par des decharges partielles pour les types d'isolation papier-huile. CIGRE V.1970
4. IEC - Draft - Recommended test methods for determining the relative resistance of insulating materials to breakdown by surface discharge. T.C. 15 B.
5. Renne W.T. - Kondensatory z trójwarstwowym dielektrykiem papier-olej izolacyjny-folia syntetyczna. Przegląd Elektrotechniczny z.1 1969r.
6. Kenney N.D., Koulopoulos M.J. - 115 kV and 138 kV Polyethylene-insulated and cable evaluation data. CIGRE 1968.
7. Guyotand A. - Recherche d'une formulation théorique de la duree de vie des isolants solides. 1968r.