

Jerzy Wodziński

UDZIAŁ POLA ELEKTRYCZNEGO W PROCESIE STARZENIA IZOLACJI  
PAPIEROWO-OLEJOWEJ POD WPŁYWEM WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

1. Wprowadzenie

Pojawienie się wyładowań niezupełnych w układzie izolacyjnym świadczy o przekroczeniu w jakimś punkcie naprężeń krytycznych. Przekroczenie to może wystąpić w ośrodku olejowym lub - co jest bardziej prawdopodobne - w pęcherzyku lub szczelinie gazowej. W tym ostatnim przypadku wartości krytyczne naprężeń, zależne od wymiarów ośrodka gazowego, można ocenić z wzoru [3]:

$$E_{kr} = \frac{0,4}{a} + 27,5 \quad [\text{kV}]$$

gdzie  $a$  - grubość szczeliny w [cm] w granicach  $0,01 \div 0,1$  cm.

Jeśli przyjmie się dla uproszczenia, że wtrącina gazowa ma kształt zbliżony do kulistego i znajduje się w polu elektrycznym, które w najbliższym jej otoczeniu można przyjąć za równomierne, to zgodnie z wzorem Clausiusa-Mosottiego naprężenie w dielektryku będzie następujące:

$$E_d = E_w \frac{1 + 2\epsilon'}{3\epsilon'}$$

gdzie  $E_w$  - naprężenie występujące w szczelinie,

$\epsilon'$  - względna stała dielektryczna materiału izolacyjnego.

Z podanych wyrażeń można napisać warunek na naprężenia panujące w dielektryku w obszarze występowania wyładowań szczelinowych

$$E_d \geq \frac{1 + 2\epsilon'}{3\epsilon'} / \frac{0,4}{a} + 27,5/$$

Może ono osiągać dość znaczne wartości np. dla szczeliny o grubości 0,1 mm występującej w izolacji papierowo-olejowej można naprężenia w dielektryku ocenić na nie mniejsze od 51 kV/cm. Nie mniejsze wartości mogą występować w dielektryku w miejscach rozwijania się w środku olejowym wyładowań ślizgowych. Te występujące lokalne naprężenia mogą być powodem przyspieszenia degradacji termicznej celulozy wskutek wydzielania się w tym miejscu znacznych energii w wyniku strat dielektrycznych, bądź też innych procesów fizykochemicznych.

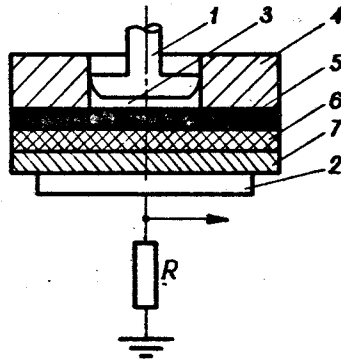
Podane wyżej rozważania dotyczyły tylko pola stacjonarnego, wytwarzanego przez napięcie przemienne. Dodatkowe straty energii w dielektryku mogą występować w wyniku działania pola szybkozmiennego, związanego z rozwojem wyładowania w szczelinie, figury Lichtenberga powstającej po jej zwarceniu, a w przypadku iskier ślizgowych - z rozwojem samej iskry. Pole to charakteryzuje się dużą szybkością zmian oraz znacznymi lokalnymi naprężeniami, występującymi w szczególności przed czołem rozwijającego się wyładowania.

Degradujący wpływ pola stacjonarnego czy szybkozmiennego nie ma większego znaczenia w przypadku dielektryków syntetycznych, ponieważ współczynniki stratności tych materiałów są co najmniej o dwa rzędy mniejsze od tej izolacji papierowo-olejowej. Natomiast długotrwałe działanie pola na izolację papierowo-olejową może znacznie przyspieszyć destrukcyjne działanie wyładowań niezupełnych.

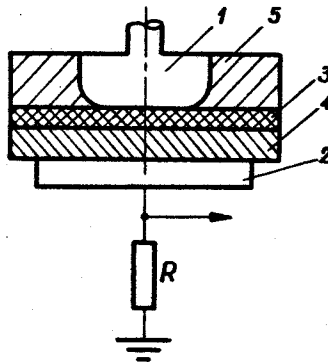
W celu wyjaśnienia oddziaływania pola elektrycznego na proces degradacji izolacji papierowo-olejowej, zachodzący w obszarze bezpośrednio przyległym do szczeliny gazowej, w której występują wyładowania, przeprowadzono serię prób na modelach.

## 2. Badanie wpływu pola stacjonarnego

Badania przeprowadzono w układzie elektrod podanym na rysunku 1.



Rys.1. Schemat układu probierczego do prób na działanie wyładowań niezupełnych. 1,2 - elektrody miedziane  $\varnothing$  20 i 60 mm; 3 - szczelina gazowa, 4 - pierścień z polimetakrylanu metylu, 5 - przekładka izolująca z folii estrofcji o grubości 80  $\mu$ m, 6 - badana próbka izolacji papierowo-olejowej /0,3 mm/, 7 - przekładka z polietylenu o grubości 1,5 mm, R - opornik detekcyjny.



Rys.2. Schemat układu probierczego do badania oddziaływania pola stacjonarnego /bez wyładowań niezupełnych/. 1,2 - elektrody  $\varnothing$  40 i 60 mm, 3 - badana próbka izolacji papierowo-olejowej /0,3 mm/, 4 - przekładka z polietylenu /1,5 mm/, 5 - otulina z żywicy epoksydowej zapobiegająca powstawaniu wyładowań krawędziowych.

Badana próbka izolacji papierowo-olejowej składała się z 5 warstw papieru o grubości  $60 \mu\text{m}$  każda /łączna grubość  $0,3 \text{ mm}$ /. Technologia suszenia i impregnacji próbek była taka jak stosowana w transformatorach. W celu uniknięcia zalewania szczeliny gazowej przez olej, odsączano jego nadmiar przed umieszczeniem próbki w układzie probierczym. Górna elektroda była odsunięta od papieru o  $0,8 \text{ mm}$ . Imitowała tym samym szczelinę gazową powstającą w układzie izolacyjnym. Grubość szczeliny wybrano na podstawie doświadczenia. Przy mniejszych grubościach następowało zbyt szybkie zalewanie szczeliny olejem na skutek hydrodynamicznego działania pola elektrycznego [1,2,6]. Występowanie natomiast większych grubości szczelin w izolacji jest nader mało prawdopodobne.

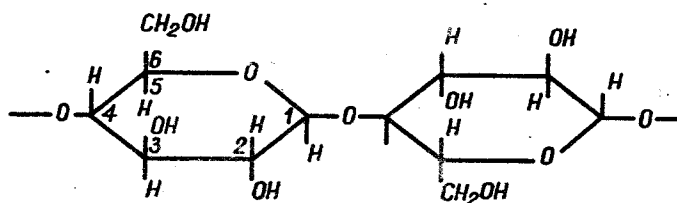
O wyborze średnicy górnej elektrody zdecydowały dwa czynniki: konieczność uzyskania równomiernego pola o dostatecznej dla celów detekcji stopnia polimeryzacji celulozy, powierzchni oraz chęć zapewnienia względnie swobodnego rozwoju figur Lichtenberga związanych z poszczególnymi wyładowaniami w szczelinie.

Zastosowany w układzie pierścien z polimetakrylanu metylu miał za zadanie dociskać próbkę do dolnej elektrody, ograniczać dopływ oleju z zewnętrznego obszaru, a także ograniczać rozprzestrzenianie się wyładowań poza układ elektrod.

Pomiaru intensywności wyładowań niezupełnych i widma impulsów dokonywano za pomocą analizatora i licznika impulsów [1,2]. Za czas próby przyjęto 100 godzin. W celu odizolowania badanej próbki od czynników zewnętrznych, układ probierczy umieszczono w zamkniętej komórce z polimetakrylanu metylu. Komórka była zaopatrzona w dwa króćce o małej średnicy  $\varnothing 1 \text{ mm}$ , co pozwalało na swobodny odpływ wytwarzających się gazów. Jednocześnie niewielkie nadciśnienie wewnątrz komórki nie pozwalało na dopływ do szczeliny tlenu i wilgoci.

Do badania stopnia zesterzenia izolacji papierowo-olejowej wykorzystano elektronowy rezonans paramagnetyczny /EPR/ [1,2,5]. Metoda ta pozwala pomierzyć zawartość wolnych rodników w dielektryku. Jak wynika

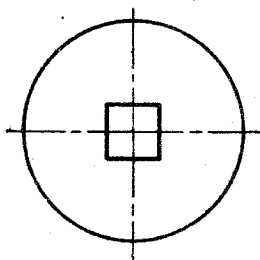
z przeprowadzonych doświadczeń, starzony różnymi metodami olej transformatorowy nie zawiera wolnych rodników, a więc ich źródłem mogą być tylko zerwane wiązania w łańcuchach celulozy [1,2]\*. Najczęściej EPR łączy się z rodnikami alkoksyłowymi, które tworzą się w pozycji C<sub>1</sub>, C<sub>4</sub> /rys.3/. Badania wykazały także, że sygnał EPR jest skorelowany ze średnim stopniem polimeryzacji celulozy, a więc wskazuje na stopień jej starzenia.



Rys.3. Fragment łańcucha celulozy

Istotną zaletą tej metody badania struktury fizykochemicznej izolacji jest stosunkowo niewielka masa próbki, jaką należy pobrać do pomiaru.

Zależy od tego bowiem nie wynik, a tylko czułość pomiaru. Dokładność pomiaru zależy od wielu czynników. W niekorzystnych warunkach można go szacować na ok.30 % [1]. Z tego względu uzyskane wyniki należy traktować raczej jako porównawcze, a nie ilościowe.\*\*



Rys.4. Schemat pobierania próbki do badań EPR /powierzchnia próbki 1 cm<sup>2</sup> /

\* Brak rodników w zestarzonej oleju wynika z bardzo krótkiego czasu ich życia.

\*\* Dodatkowym czynnikiem, który utrudnia ilościową ocenę tego zjawiska, jest zanik rodników w czasie samej próby. Wprowadzanie próby oceny tego zjawiska [2], brak jednak dostatecznych danych do ilościowego ujęcia. Porównanie ułatwia jednakowoż czas przeprowadzania prób.

Po przeprowadzeniu starzenia pobrane próbki umieszczono w ciekłym azocie. Miało to wykluczyć termiczny zanik rodników w okresie pomiędzy pobraniem próbki a pomiarem.

#### Wyniki badań

W celu wyjaśnienia udziału pola elektrycznego w procesie degradacji wykonano kilka serii pomiarów:

1/ Między elektrodami umieszczano tylko badaną próbkę /bez folii 5 i warstwy polietylenu 7/. W układzie tym dielektryk był poddany łącznemu działaniu wyładowań niezupełnych, pola stacjonarnego i szybko-zmiennego. Naprężenia w izolacji, szczególnie po zwarcu szczeliny, duże /rys.1/.

2/ Na badanej próbce z układu 1 umieszczono cienką folię syntetyczną 5, której zadaniem było odseperowanie wyładowań niezupełnych od papieru. Naprężenia w izolacji duże /rys.1/.

3/ W szereg z badaną próbką umieszczono warstwę polietylenu 7, której zadaniem było zmniejszyć naprężenia w izolacji papierowo-olejowej po przeskoaku w szczelinie, przy zachowaniu naprężeń przed zwarcie. W tym celu zwiększono odpowiednio napięcie próby. Po przeskoaku naprężenie zmniejszyło się ok. 6 razy /rys.1/.

4/ W układzie z punktu 3 zastosowano folię osłaniającą 5 /rys.1/.

5/ W układzie bez wyładowań niezupełnych umieszczano tylko próbkę izolacji papierowo-olejowej. Naprężenia w izolacji duże /rys.2/.

6/ W szereg z badaną próbką umieszczono przekładkę z polietylenu 7. Naprężenie w izolacji papierowo-olejowej zmniejszyło się ok.10 razy /rys.2/.

W każdej serii poddano badaniu 10 próbek. Mierzono przy tym intensywność wyładowań niezupełnych. Przy pomiarze EPR uwzględniano liczbę spinów zawartą w papierze niestarzonym, a pozostałą tam w wyniku procesu technologicznego suszenia i impregnacji. Jako wynik próby przyjęto piędziesiąto procentową wartość określoną z dystrybuanty rozkładu normalnego.

Tabela 1

| Rodzaj próby<br>/oznaczenia<br>wg.pkt.2 / | Napięcie<br>próby<br>kV | Czas<br>próby<br>h | Liczba spinów na gram x 10 <sup>16</sup> w war-<br>stwie: |     |      |      |      |
|---|-------------------------|--------------------|---|-----|------|------|------|
|   |                         |                    | 1   | 2   | 3    | 4    | 5    |
| 1   | 6                       | 100                | 13,5  | 7,0 | 9,2  | 9,7  | 9,9  |
| 2   | 6                       | 100                | 11,8  | 9,7 | 11,2 | 12,0 | 11,3 |
| 3   | 10                      | 100                | 10,5  | 7,2 | 6,4  | 6,7  | 6,2  |
| 4   | 10                      | 100                | 7,3   | 6,9 | 8,1  | 8,4  | 8,4  |
| 5   | 10                      | 100                | 10,4  | 9,3 | 9,6  | 11,3 | 13,2 |
| 6   | 10                      | 100                | 6,5   | 6,0 | 4,9  | 5,9  | 6,0  |

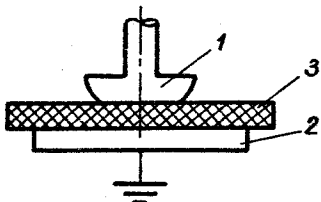
Jak wynika z tabeli 1, udział pola elektrycznego w procesie starzenia celulozy jest nie do pominięcia. Starzenie występuje we wszystkich warstwach. Wyniki z serii próbek poddanych bezpośrednio działaniu wyładowań niezupełnych potwierdzają przypuszczenie /potwierdzone zresztą przez literaturę/, że degradacja pod wpływem wzm występuje tylko na powierzchni dielektryku. Działanie jonów, elektronów i promieniowania ultrafioletowego połączonego z wyładowaniami nie może sięgać w głąb dielektryku. Podobnie dotyczy to działania termicznego kanału wyładowania.

### 3. Badania wpływu pola szybkozmiennego

Badanie przeprowadzono w układzie elektrod podanym na rysunku 5. Elektrode górną wykonano z mosiądzu w postaci półkuli o średnicy 20 mm. Dolną jej część splanowano tak, aby powierzchnia styku elektrody z papierem miała kształt koła o średnicy 11 mm. Dolną elektrodę płaską o  $\varnothing$  60 mm wykonano także z mosiądzu.

Po umieszczeniu próbki między elektrodami całość zalano olejem w celu uniknięcia wyładowań niezupełnych. Próbkę poddano działaniu impulsów napięciowych o kształcie 1,2/50  $\mu$ s. Wybór kształtu napięcia probierczego był czysto arbitralny. Wiadomo bowiem, że czasowe parametry

try gradientów potencjału w izolacji, związane z rozwojem wyładowań niezupełnych, mogą mieć dość różnorodne wartości. Zależą bowiem od wielu parametrów [9]. W tym przypadku chodziło tylko o ocenę wpływu zjawiska, a nie o dane liczbowe.



Rys.5. Układ elektrod do badania wpływu pola szybkozmiennego na degradację izolacji papierowo-olejowej. 1,2 - elektrody, 3 - badana próbka.

### Wyniki badań

Wykonano trzy serie badań:

1/ Grubość próbki 0,3 mm. Liczba próbek w serii - 10. Do próbki doprowadzono 1000 uderów. Czas próby /ok. 30 min/ został dobrany ze względu na zanik rodników.

2/ Grubość próbki 0,15 mm. Wartość szczytową napięcia /12 kV/ dobrano tak, aby naprężenia w dielektryku były niższe o ok. 15+20 % od naprężeń przebicia. Liczba próbek 8. Czas próby ok. 30 minut. Liczba uderów - 1000.

3/ Grubość próbki 0,15 mm. Napięcie próby 12 kV. Liczba przyłożonych uderów - 100. Czas próby 4+5 minut. Liczba próbek 8. Pomiar EPR, obróbka wyników taka jak w p.2. Wyniki zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2

| Rodzaj próby /oznaczenia wg. pkt.3/ | Liczba uderów | Naprężenie kV/mm | Liczba spinów na gram x 10 <sup>16</sup> w warstwie: |      |      |      |      |
|-------------------------------------|---------------|------------------|--|------|------|------|------|
|                                     |               |                  | 1  | 2    | 3    | 4    | 5    |
| 1                                   | 1000          | 33,3             | 12,1   | 12,1 | 10,8 | 12,2 | 12,9 |
| 2                                   | 1000          | 66,7             | 20,5   | 18,5 | 20,0 | -    | -    |
| 3                                   | 1000          | 66,7             | 18,8   | 16,8 | 18,6 | -    | -    |



Wyniki przedstawione w tabeli 2 nie wymagają większych komentarzy. Jak widać, również pole szybkozmienne ma wpływ na procesy degradacyjne. Jest rzeczą oczywistą, że wybór kształtu napięcia, jak i jego wartości, nie odpowiadają warunkom rzeczywistym występującym przy działaniu wyładowań niezupełnych. Ale, jak już powiedziano wyżej, nie chodziło w tym przypadku o liczbowe określenie wpływu poszczególnych czynników, a o stwierdzenie takiej możliwości. Dodatkowo wybór takich parametrów pozwolił ocenić, czy w czasie badań wytrzymałości izolacji papierowo-olejowej napięciami udarowymi występuje "efekt kumulacji". Wyniki badań wydają się potwierdzać to przypuszczenie. Oczywiście, zbyt mała liczba wyników nie pozwala jeszcze na jednoznaczną odpowiedź. Wymaga to jeszcze szerszych badań. Stwierdzenie wystąpienia zjawiska kumulacji może mieć wielorakie konsekwencje. Przy próbach statystycznych wytrzymałości izolacji papierowo-olejowej założenie niezależności poszczególnych prób staje się dyskusyjne. Metodyka prób udarowych nie może być także dla badanej izolacji obojętna. Stwierdzenie występowania kumulacji działania napięć udarowych wydaje się być istotne, mimo iż uważa się, że w szerokich granicach wartości stopnia polimeryzacji celulozy, wytrzymałość elektryczna układu papier-olej jest od niego niezależna [11], choć są i inne poglądy [7].

#### 4. Wnioski

1/ W procesie degradacji izolacji papierowo-olejowej pod wpływem wyładowań niezupełnych istotną rolę spełnia pole elektryczne stacjonarne i szybkozmienne. Z tego punktu widzenia wydaje się, że na wzn w dielektryku papierowo-olejowym należy spojrzeć bardziej jako na sygnał przekroczenia w niektórych fragmentach izolacji odpowiedniej wartości naprężeń.

2/ W dielektryku papierowo-olejowym występuje zjawisko kumulowania się działania doprowadzanych kolejno udarów napięciowych.

## LITERATURA

1. Szczepański Z., Wodziński J. i inni: Badania korelacji między wskaźnikami wyładowań niezupełnych w izolacji papierowo-olejowej transformatorów energetycznych. Opr.dla Instytutu Elektrotechniki O/L, Łódź 1976.
2. Szczepański Z., Wodziński J. i inni: Badania nad fizycznymi kryteriami intensywności wyładowań niezupełnych zapewniającymi korelację z szybkością degradacji izolacji papierowo-olejowej w transformatorach. Opr.dla Instytutu Elektrotechniki O/L, Łódź 1978.
3. Szczepański Z., Lechowski Z., Rosicki A., Wodziński J.: Układy izolacyjne urządzeń elektroenergetycznych. PWN Warszawa 1978.
4. Galand J., Goliński J., Łabus-Nawrat K., Morel J.P.: Mechanizmy powstawania wyładowań niezupełnych w izolacji papierowo-olejowej. Przegląd Elektrotechn., nr.1, 1975.
5. Altszuler S.A., Koryniew B.M.: Elektronowy rezonans paramagnetyczny. PWN 1970.
6. Bessci H., Gockenbach E.: Kräfte aus Flüssigkeitoberflächen im elektrischen Gleichfeld mit und ohne Vorentladungen. ETZ-A 96 H.3, 1973, s.154.
7. Heller B., Veverka A.: Elektrická pevnost. Praha: CSAV 1967.
8. Kozłowski M.: Sprawozdanie z kollokwium Komitetu Studiów Nr.12 CIGRE /28.IX.-3.X.75 Tokic/. Dokument IEL. O/L 1975.
9. Kind D.: Grundlagen des Messeinrichtungen für Koronaisolationsprüfungen. ETZ-A, 1963, 84, s.871.