

Mgr inż. Kasylda Lebus-Nawrat
Instytut Elektrotechniki
Zakład Wysokich Napięć
Warszawa

WYŁADOWANIA NIEZUPEŁNE W IZOLACJI PAPIEROWO-OLEJOWEJ ZE STEROWANYM POLEM ELEKTRYCZNYM

1. Wstęp

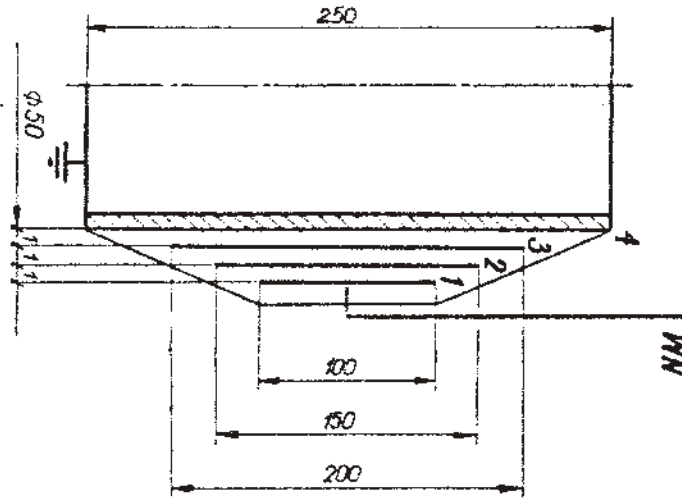
Celem niniejszej pracy była próba uchwycenia na podstawie badań modelowych parametrów decydujących o powstawaniu wyładowań niezpełnych w izolacji papierowo-olejowej przekładników prądowych ze sterowanym polem elektrycznym. Zagadnienie to wobec tendencji normalizacyjnych ma istotne znaczenie praktyczne. W literaturze spotkać można szereg publikacji omawiających wpływ poszczególnych parametrów, brak jest jednak ujęcia syntetycznego bądź jakiejś powszechnie uznanej hipotezy przebiecia izolacji papierowo-olejowej w wyniku wyładowań niezpełnych. Jako parametry decydujące o powstawaniu wyładowań niezpełnych rozumie się takie czynniki jak grubość izolacji między elektrodami, stopień wysuszenia izolacji, stopień odgazowania izolacji, rodzaj i gęstość papieru, nierówność pola itp.

Ze wszystkich tych parametrów najlepiej został określony wpływ grubości izolacji, który został określony wzorami powszechnie uznanymi [1, 2, 3].

Niniejsza praca uwzględnia przede wszystkim wpływ takich parametrów na rozwój wyładowań niezpełnych, jak stopień wysuszenia i odgazowania izolacji a ponadto wpływ czasu, częstotliwości, wartości napięcia i intensywności wyładowań niezpełnych.

Badania prowadzone były na modelach wykonanych według rys.1. Izolację stanowił papier nawojowy plisowany o grubości 60 μm i gęstości 0,85 g/cm^3 . Zmienną wartość wilgoci uzyskiwano poprzez zmianę parametrów suszenia tj. czasu i temperatury. Podstawowa grupa model.

impregnowana była krajowym olejem transformatorowym zgodnie z PN-65/0-96058, bądź olejem kondensatorowym Dussek, próżniowo to znaczy degazowywana w ciągu 1 godziny w próżni 0,1... 1 Tr, następnie zalewana olejem odgazowanym a potem sycona przez czas 1 godziny w próżni.



Rys.1. Układ modelowy do badania wyładowań niezupełnych w izolacji papierowo-olejowej. 1,2,3,4 - kolejne numery ekranów.

W modelach tych panował nierównomierny stopień rozkładu napięcia tj. na izolacjach między kolejnymi ekranami udział doprowadzonego napięcia wynosił 45, 31 i 24 %. Badania obejmowały pomiar ładunku pozornego

niernikiem ERA model III oraz uzupełniający pomiar średniego prądu wyładowań niezupełnych w funkcji napięcia i czasu, jak również pomiar wytrzymałości elektrycznej długotrwałej połączonej z lokalizacją miejsc uszkodzeń izolacji.

2. Badania powstawania wyładowań niezupełnych

2.1. Wpływ stopnia wysuszenia.

Wilgoć jest po grubości izolacji względnie dobrze opracowana w szeregu publikacji traktujących tylko o tym zagadnieniu [4, 5, 6] i częściowo w publikacjach [3, 7, 8].

W pracach Zakładu Wysokich Napięć Instytutu Elektrotechniki wpływ tego parametru był również dość szeroko przebadany. W szeregu badanych modeli impregnowanych próżniowo aż do napięć oszczędzonych jako E_{kryt} bez względu na stopień wysuszenia izolacji nie występowały żadne wyładowania małointensywne, natomiast przy napięciach E_{kryt} pojawiały się intensywne wyładowania niezupełne zwane dalej krytycznymi, które charakteryzowały się częstotliwością występowania $200...1000 s^{-1}$ oraz ładunkiem pozornym $2,5... 200 nC$. Wyładowania te zaczynają się w części izolacji, gdzie panują najwyższe napięcia tj. między 1 i 2 ekranem. W przypadku wilgotnej izolacji /5... 7% wilgotności/ wyładowania te występowały w środku ekranu przy E_{kryt} 14... 18 kV/mm, a w wysuszonej izolacji / 0,1.... 1% wilgotności/ występowały na krawędzi ekranów w poprzek izolacji papierowej przy E_{kryt} 14... 23 kV/mm. Otrzymane w badaniach wyniki w odróżnieniu od danych zawartych w [4, 6] dają niewielką zależność E_{kryt} od wilgoci. Wydaje się, że otrzymane różnice należy przypisać nie tylko istniejącym różnicom gatunku papieru i oleju, lecz także różnicom w sposobie przygotowania próbek do badań, które według [4, 6] zawilgocone były do odpowiedniego poziomu w komorze klimatyzacyjnej po uprzednim wysuszeniu i były impregnowane bezpróżniowo przez zanurzenie.

Według innych źródeł wilgoć ma decydujący wpływ na czas do pojawienia się wyładowań niezupełnych małointensywnych [6, 7, 8] przy czym według autorów francuskich występowanie wilgoci jest niezbędne do występowania małointensywnych wyładowań, gdyż dla izolacji suchej w $< 3\%$ stwierdzono tylko występowanie wyładowań krytycznych prowadzących w polu jednorodnym bezpośrednio do przebicia.

Można też, poza wynikami eksperymentalnymi, znaleźć w literaturze [4, 5] hipotezy odnośnie roli wilgoci w mechanizmie powstawania wyładowań niezupełnych.

I tak według Krasuckiego i współautorów powstawanie wyładowań niezupełnych poprzedzone jest emisją elektronową w miejscach, gdzie lokalne naprężenia /krawędź elektrody lub przewodzące wtrąciny/ przekraczają 100 kV/mm. Emisja ta prowadzi do dysocjacji cząstek wody co skoślej ułatwia elektrolizę a zatem wydzielanie się tlenu i wodoru na elektrodach, powstawanie pęcherzyków gazów, a w nich wyładowań niezupełnych.

Kogan przyjął analogiczny mechanizm powstawania najpierw pęcherzyków a później w nich wyładowań niezupełnych. Przy czym pęcherzyki gazowe przy elektrodach są efektem prądu przewodnictwa jonowego najbardziej zawilgoconych włókien celulozy. Kogan podkreśla jednak, że hipoteza ta dotyczy przede wszystkim podwyższonych temperatur / $t > 60^{\circ}\text{C}$ /, natężenia pola $K > 9$ kV/mm i wilgotności w $> 4,5\%$.

Z analizy wyników naszych badań wynika, że dla wystąpienia małointensywnych wyładowań niezupełnych konieczne jest istnienie pęcherzy gazowych. Pęcherze takie mogą powstawać nie tylko z rozkładu cząstek wody, ale również oleju i celulozy. W wyniku długotrwałej emisji elektronowej /na przykład z krawędzi elektrod/ i powstającej lokalnej jonizacji lawinowej następuje wydzielanie się wodoru, który w zależności od gatunku oleju prowadzi do szybszego bądź późniejszego powstawania pęcherzy. Proces ten zachodzi jednak powoli w czasie rzędu miesięcy także przy naprężaniu rzędu 6 kV/mm. Wpływ zawilgocenia uwidacz-

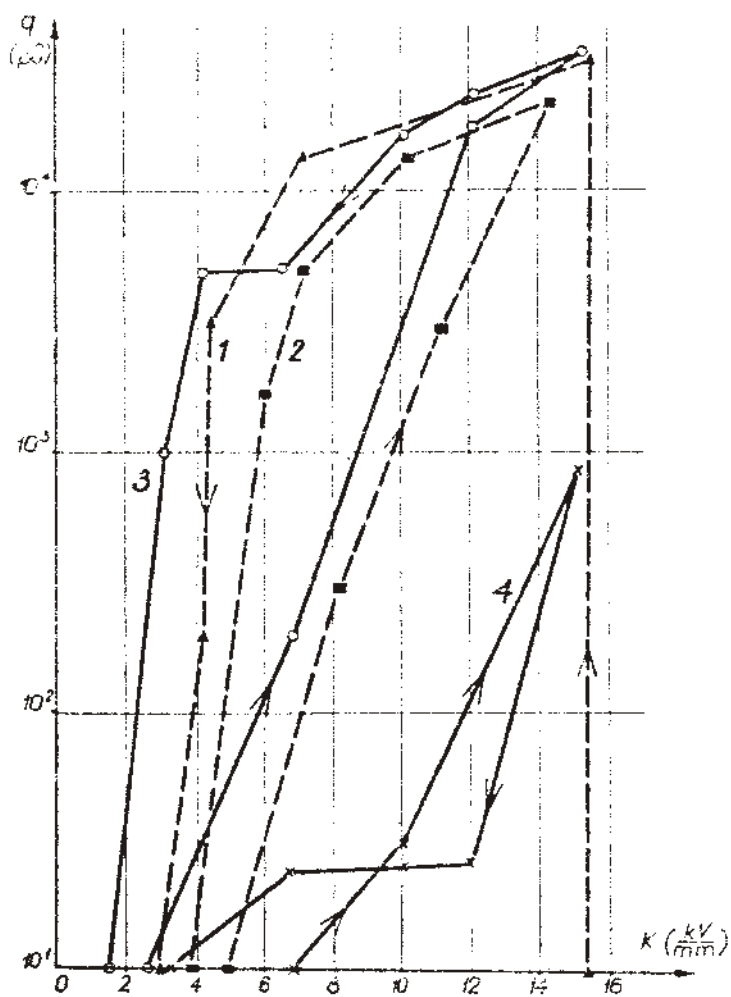
nia się przede wszystkim na skrócenie czasu życia izolacji przy występowaniu wyładowań krytycznych [9], gdyż wstępne przebicia elektryczne wilgotnego papieru prowadzą bardzo szybko do tworzenia zwęglonych przewodzących kanałów.

2.2. Wpływ stopnia odgazowania izolacji papierowo-olejowej.

Różny stopień odgazowania izolacji papierowo-olejowej uzyskiwany był na drodze impregnacji próżniowej, wtórnego zapowietrzenia zaimpregnowanych próżniowo modeli poprzez wyjmowanie ich z oleju na czas od paru minut do paru dni, bądź przez tworzenie sztucznych pęcherzy poprzez wstrzykiwanie do izolacji powietrza oraz na drodze impregnacji bezpróżniowej. Wykonane pomiary na modelach dobrze zaimpregnowanych wykazały, że niezależnie od stopnia wysuszenia jedynie w nielicznych modelach już przy podnoszeniu napięcia powstawały wyładowania mało-intensywne /o małej częstości bądź niestabilne/ przy naprężeniu 12... ..15 kV/mm, których intensywność ze wzrostem naprężeń pozostawała stała, bądź malała. Przyczyną tego były prawdopodobnie mikroskopijne pęcherze przy ekranach, pozostałe na skutek niedoskonałości procesu odgazowania, które pod wpływem wyładowań niezupełnych bądź pola elektrycznego wypychane były z miejsc największych naprężeń bądź też były rozpuszczane przez olej.

Próba zapowietrzenia modeli poprzez wyjmowanie na pewien czas modeli, bądź wstrzykiwanie powietrza wzdłuż warstw papieru przy krawędzi elektrod nie wpływała w sposób wyraźny na wystąpienie mało-intensywnych wyładowań niezupełnych. Dopiero utworzenie sztucznych pęcherzy poprzez wstrzykiwanie powietrza pod ekran w poprzek izolacji spowodowało wystąpienie mało-intensywnych wyładowań już przy naprężeniu 3 kV/mm a także obniżenie się progu wyładowań krytycznych do 11 kV/mm.

W tym przypadku jednak po 2-dniowej przerwie beznapięciowej próg wyładowań mało-intensywnych wystąpił dopiero przy 6 kV/mm, a intensywność ich znalazła, zaś próg wyładowań krytycznych wystąpił przy pierwotnej

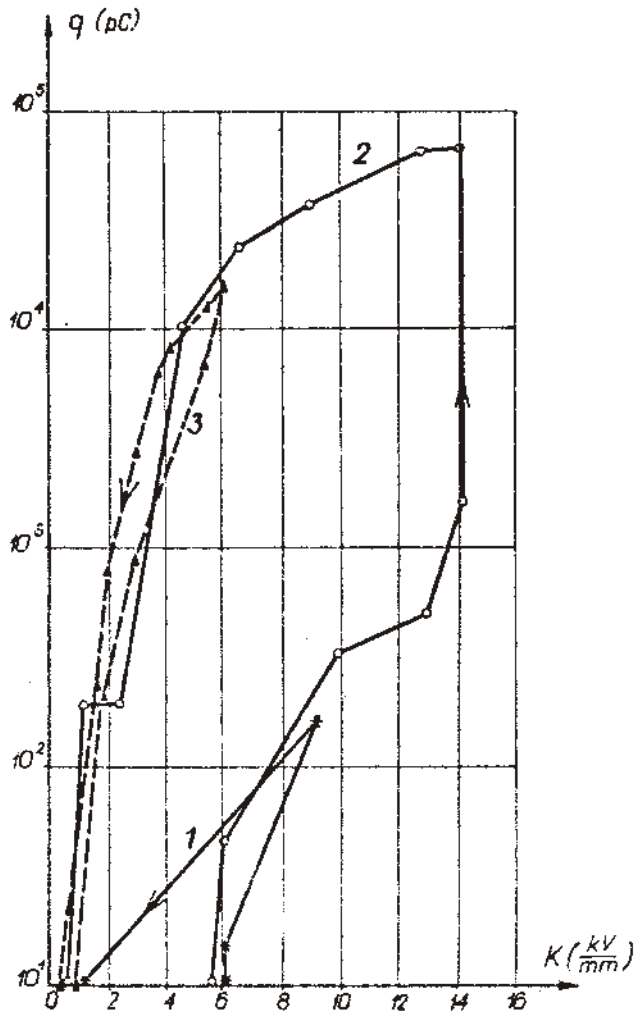


Rys.2. Zależność ładunku pozornego od napięć w modelach impregnowanych próżniowo:

- 1 - przy pierwszym podnoszeniu napięcia w modelu 22,
- 2 - przy podnoszeniu napięcia bezpośrednio po pomiarze 1,
- 3 - po utworzeniu sztucznych pęcherzy poprzez wstrzyknięcie powietrza w poprzek izolacji w modelu 18,
- 4 - pomiar w modelu 18 po 2 dobach od pomiaru 3.

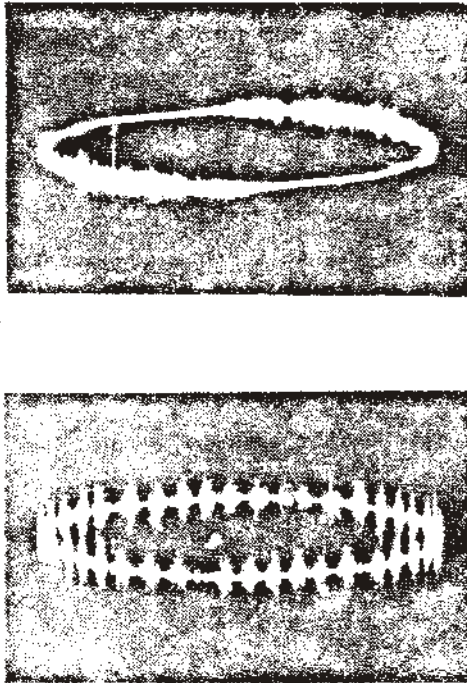
wartości naprężenia /krzywa 3, 4 z rys.2/. Analogiczne zjawiska mają miejsce również w dobrze zaimpregnowanej izolacji po wywołaniu w niej wyładowań krytycznych powodujących rozkład oleju i wydzielenie się gazu /krzywa 1,2 - z rys.2/.

W grupie modeli impregnowanych próżniowo wyodrębniono 4 modele, które zaimpregnowano niewystarczająco odgazowanym olejem. We wszystkich tych modelach już dla naprężeń 4... 6,6 kV/mm powstają małointensywne wyładowania niezupełne rosnące z naprężeniem od 10...1000 pC przy czym mimo podnoszenia naprężeń tylko do wartości 9 kV/mm naprężenia gaśnięcia wynosiły 0,9 - 4,5 kV/mm /krzywa 1 z rys.3/. Fakt ten świadczy, że czas dejonizacji niewielkich pęcherzy nawet w przypadku niezbyt intensywnych wyładowań jest rzędu minut. Należy jeszcze dodać, że K_{kryt} tych modeli nie zależy od występowania w nich małointensywnych wyładowań /krzywa 2 z rys.3/. W modelach impregnowanych bezpróżniowo wartości naprężeń, przy których pojawiały się wyładowania małointensywne, rosnące z naprężeniem /krzywa 3 z rys.3/, były bardzo niskie, tj. 0,9...1,6 kV/mm, przy czym z upływem czasu obserwowano wzrost tych naprężeń. Wyładowania krytyczne w tych modelach powstawały nie na krawędzi elektrod lecz między elektrodami dając w efekcie zniszczenie całej izolacji w poprzek już przy naprężeniach 2 ... 2 kV/mm tj. po kilka przebiegów między elektrodami. Śladów wyładowań krawędziowych dla naprężeń wzdłużnych 1,4 kV/mm nawet po czasie starzenia przez 40 dni przy napięciu o częstotliwości 1000 Hz nie stwierdzono. Wyładowania takie mogłyby być spowodowane wyższymi naprężeniami. Tak więc osłabienie izolacji na skutek impregnacji przez zanurzenie powoduje większe obniżenie wytrzymałości izolacji w poprzek niż wzdłuż warstw papieru. Warto jeszcze dodać, że naprężenia progu wyładowań małointensywnych w impregnowanych bezpróżniowo modelach leżą poniżej naprężeń 1,2 ... 2,3 kV/mm będących naprężeniami progu modeli suszonych lecz nieimpregnowanych /badanych w powietrzu na sucho/.



Rys.3. Zależność ładunku pozornego od naprężeń w modelach 28 i 29 impregnowanych próżniowo niewystarczająco odgazowanym olejem i w modelu 32 impregnowanym bezpróżniowo: 1 - model 28, 2 - model 29, 3 - model 32.

Częstotliwość wyładowań małointensywnych w tych modelach jest tak duża, że ich oscylogramy /rys.4/ mogą sugerować iż są to wyładowania krawędziowe.



Rys.4. Oscylogramy małointensywnych wyładowań niezupełnych w modelach impregnowanych bezpróżniowo:
Osc.1 - $f = 50$ Hz, osc. 2 - $f = 1000$ Hz.

Porównując wyniki badań należy stwierdzić, że w przypadku izolacji dobrze zaimpregnowanej nawet po wytworzeniu w niej znacznej

ilości gazu na przykład przez wywołanie wyładowań krytycznych, naprężenia progu wyładowań leżą wyżej niż dla impregnowanych bezpróżniowo. Ponadto mimo, iż ładunek pozorny takich wyładowań jest większy niż w impregnowanych bezpróżniowo to po kilku dniach przerwy beznapięciowej dobrze zaimpregnowana izolacja odzyskuje swoje pierwotne własności, a stan izolacji impregnowanej bezpróżniowo nawet po kilkudziesięciu dniach przerwy nie ulega poprawie.

Zagadnienie wpływu stopnia odgazowania izolacji na powstawanie wyładowań niezupełnych jest w odróżnieniu od stopnia wysuszenia znacznie rzadziej poruszane a wyniki porównawcze można znaleźć tylko w publikacji [3]. Jako podstawową grupę Constandinou badał modele impregnowane próżniowo, w których występowało zwiększenie progu naprężeń wyładowań niezupełnych małointensywnych z 2,5 kV/mm bezpośrednio po impregnacji do 10 kV/mm po 3 dniach, co zostało przypisane rozpuszczeniu się nielicznych pęcherzyków w oleju. Uzupełniając badania on modele zapowietrzane po impregnacji próżniowej oraz modele impregnowane bezpróżniowo, w obu tych grupach Constandinou stwierdził krótsze czasy do przebicia niż w grupie modeli impregnowanych próżniowo. W modelach impregnowanych bezpróżniowo zaobserwował on okresowe zmiany intensywności wyładowań niezupełnych, które przypisał ruchowi pęcherzy w oleju oraz podziałowi pęcherzy w wyniku działania wyładowań niezupełnych ułatwiającemu ich rozpuszczanie w oleju.

2.3. Wpływ pozostałych parametrów.

Pozostałe badane parametry takie jak częstotliwość napięcia, gatunek oleju, temperatura modeli, mają drugorzędny wpływ na powstawanie wyładowań niezupełnych.

I tak przy częstotliwości napięcia 50 i 1000 Hz obserwowano praktycznie takie same wartości naprężeń progu wyładowań małointensywnych i obniżenie K_{kryt} przy częstotliwości 1000 Hz do około 0,8 K_{kryt} przy 50 Hz.

Wpływ temperatury badany był w zakresie temperatur 20 ... 75^oC jedynie dla modeli impregnowanych próżniowo. Stwierdzono jedynie pewien wpływ w tych modelach, gdzie występowały wyładowania małointensywne na regularność ich występowania oraz na obniżenie się napięć ich gaśnięcia.

Dla obu stosowanych olejów otrzymano takie same rezultaty pod względem jakościowym jak i ilościowym, przy czym ten ostatni wniosek ma charakter przybliżony, ponieważ nie przeprowadzone zostały badania statystyczne. Wydaje się, że oba te oleje mają korzystne własności z punktu widzenia zastosowania do badanego układu izolacyjnego, gdyż nie stwierdzono dla dobrze zaimpregnowanych modeli wyładowań małointensywnych, co w badaniach innych autorów było obserwowane niezależnie od stopnia zawilgocenia [3, 6] lub tylko dla izolacji zawilgoczonej [7, 8]. Natomiast napięcia progu wyładowań krytycznych w naszych badaniach, zwłaszcza dla izolacji zawilgoczonej, leżały znacznie wyżej niż w analogicznych modelowych układach [3, 6].

3. Oddziaływanie wyładowań niezupełnych na izolację papierowo-olejową

W przypadku powstawania wyładowań niezupełnych w pęcherzach gazowych między warstwami papieru o ładunku około 1 nC o dużej częstotliwości /rys.4/ tj. o dużym średnim prądzie stwierdzono, że po dłuższym czasie ich działania /rzędu kilku dni/ już przy napięzeniach 2,5 ... 7 kV/mm, przy częstotliwości 1000 Hz następuje dalekoidący rozkład oleju aż do wystąpienia wosku X. Wosk wydzielany jest w znacznych ilościach przy czym w jednym przypadku nastąpiła praktycznie cała zamiana oleju między warstwami papieru na wosk X. Nie stwierdzono jednak wpływu powstawania wosku X na szybkość całkowitego przebicia izolacji.

O przebiciu izolacji decydowały natomiast zlokalizowane wyładowania powstające bądź w miejscach o najniższej wytrzymałości elektrycznej /głównie dla izolacji mokrej/ bądź w miejscach o największych natężeń-

niach pola elektrycznego tj. na przykład na krawędziach ekranów, co miało miejsce dla izolacji dobrze wysuszonej. Miejscem o najmniejszej wytrzymałości było np. zbiegnięcie się przewodzącego punktu w papierze z przerwą między papierami w sąsiedniej warstwie.

Rozwijające się wyładowania nawet po dojściu do elektrody pośredniej nie stanowią zwarcia iskrowego a tym bardziej łukowego z tą elektrodą, a są jakby szeregiem iskier rozkładających olej i łączących się przez mikroskopijne niewzweglone otwory w papierze. Dopiero wzrost intensywności wyładowań na skutek wzrostu średnicy tego dzielonego kanału gazowego, powoduje rosnące uszkodzenie papieru prowadzące aż do jego pełnego zwęglenia. Obserwowano przecież w dobrze wysuszonej i zaimpregnowanej izolacji, nawet po kilku minutach występowania wyładowań krytycznych, powrót do pełnej wytrzymałości elektrycznej po kilkudniowej przerwie beznapięciowej. Fakt nieobserwowania obniżenia K_{kryt} modeli impregnowanych próżniowo nieodgazowanym olejem oraz brak w większości badanych przypadków powstawania wyładowań małointensywnych świadczy o tym, że do zapoczątkowania wyładowań krytycznych potrzebna jest inna przyczyna niż występowanie tych wyładowań małointensywnych. Związane jest to być może z koniecznością wystąpienia wystarczająco intensywnej emisji elektronowej na przykład z krawędzi elektrody bądź z przewodzącego punktu w papierze, znajdującego się pod elektrodą. Nie można wykluczyć, że źródłem takiej emisji elektronowej są słabe punkty półprzewodzących zanieczyszczeń celulozy analogiczne do aktywnych punktów izolacji w mechanizmie przebicia polimerów stałych według hipotezy Golińskiego [10] .

4. Wnioski.

Przeprowadzone badania pozwalają na wyciągnięcie szeregu wniosków tj.:

- 1/ Stosowany w kraju olej transformatorowy jest odpowiedni do impregnowania izolacji papierowo-olejowej sterowanej i nie ustępuje olejowi kondensatorowemu Dussek.

- 2/ Małointensywne wyładowania rzędu 1 ... 300 pC występujące w przypadku izolacji papierowo-olejowej próżniowo impregnowanej w wyniku niedoskonałości procesu odgazowania nie stanowią zagrożenia przy napięzeniach 3 ... 4 kV/mm, zwłaszcza przy dobrych własnościach gazowych oleju.
- 3/ W przypadku występowania wyładowań krytycznych tj. $q > 10^4$ pC należy ograniczyć ich czas działania na przykład do 1 minuty, gdyż w przeciwnym przypadku mogą prowadzić do nieodwracalnych zmian własności izolacji.
- 4/ Dotychczasowy stan znajomości mechanizmu rozwoju wyładowań niezupełnych w izolacji papierowo-olejowej nie można uznać za zadowalający, dotyczy to zwłaszcza metod zwiększenia wytrzymałości elektrycznej długotrwałej w oparciu o ten mechanizm.

Spis literatura

1. Kappeler H. - Progres realises dans la construction des isolateurs de traversee a condensateurs. CIGRE 1946 ref.202.
2. Pintal J.S. - Jonizacyjnyje charakteristiki i starzenie bumazno - masliannoj kondensatornoj izolacji. Elektrotechnika 36 /1965/ nr.1, s.58.
3. Constandinou T.E - Effects of internal discharges on prospective life and overvoltage-withstand behaviour of e.h.v. oil impregnated bushings. Proc.IEE, Vol.116 1969, No 5 p.834.
4. Krasucki Z., Church H.P., Garton C.G. - A new explanation of gas evolution in electrically stressed oil-impregnated paper insulation. J.Electrochem.Soc. 1960 Vol.107, nr.7, s.518.
5. Kegan P. - Behaviour of moist oil-impregnated paper under electric stress. Proc.IEE, Vol. 110, Nr 12 1965, p.2257.

6. Euczyński G.S. i inni - Wlijanie uwłażenija na elektriczeskije charakteristiki bumažno-maślannoj izolacji kondensatornowo tipa pri pieremiennom napriażenii promyszlennoj czastoty. Elektriczestwo 1969, nr.10, s.69.
7. Lacoste R., Wind G. - Etude des phenomenes de decharges partielles. Bull.d'inf.LCIE nr.59 lub RGE 1968, nr.1.
8. Bui Ai, Lacoste R., Guyetand A., Galand J. - Etudes effectueles en 1970 par Le LCIE. Etude de phenomenes de decharges partielles. BUll d.Inf.LCIE, nr.76, Mars 1971 lub RGE 1971, Nr.3.
9. Goliński J., Łabus-Nawrat K., Radwański S. - Assessment of insulation of measuring transformers basing on the intensity of partial discharges. CIGRE 1972, ref. 15-03.
10. Goliński J. - Wieloetapowy mechanizm przebicia jonizacyjnego polimerów stałych. Przegląd Elektr. XLIV z.7/1968.