

Janusz Dubicki, Jarosław Juchniewicz

WYŁADOWANIA NIEZUPEŁNE W KRIOIZOLACJI WARSTWOWEJ

1. Wprowadzenie

Jednym z potencjalnych rozwiązań wysokonapięciowej izolacji przeznaczonej do pracy w niskich temperaturach jest izolacja warstwowa, wykonana z cienkich arkuszy dielektryku stałego, w postaci papieru lub folii, zanurzonych w cieczy kriogenicznej [1,3,11] .

Układ warstwowy, pomimo zwiększonej stratności spowodowanej obecnością dielektryku stałego, eliminuje ujemny efekt odstępników stosowanych w innych wariantach rozwiązań krioizolacji wysokonapięciowej, a także umożliwia konstruowanie izolacji giętkiej.

Dla prawidłowego wymiarowania krioizolacji warstwowej niezbędna jest znajomość dopuszczalnych naprężeń roboczych, które wynikają z obniżania się wytrzymałości dielektrycznej z czasem działania pola elektrycznego wskutek występowania procesów starzeniowych w tego typu izolacji. Dobór naprężeń roboczych oraz ocenę ilościową zachodzących zjawisk starzeniowych materiałów i układów izolacyjnych dokonuje się na podstawie wyników przyspieszonych prób starzeniowych, do których zalicza się głównie wyznaczanie krzywych życia izolacji.

Podobnie jak w izolacji konwencjonalnej, za podstawowy czynnik destrukcyjny, warunkujący przebieg krzywych życia, uważa się w krioizolacji wyładowania niezupełne.

Jakkolwiek w literaturze istnieją rozbieżności w zagadnieniu - czy

dr inż. Janusz Dubicki - Instytut Elektroenergetyki Politechniki Warszawskiej
prof. dr hab. inż. Jarosław Juchniewicz - Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej.

krioizolacja może pracować w obecności wyładowań niezupełnych [7, 11], to nie zmienia to faktu, że w czasie przyspieszonych prób napięciowych dla wyznaczenia krzywej życia krioizolacji często podnosi się napięcie sięgające kilkudziesięciu procentów wytrzymałości początkowej, co w skutkach prowadzi do powstania wyładowań niezupełnych w krioizolacji. W tych warunkach krzywa życia najczęściej nie jest linią prostą w układzie podwójnie logarytmicznym czas do przebicia - napięcie [2,7]. Powstają wówczas wątpliwości w wyborze wiarygodnej metody ekstrapolacji w zakres napięć roboczych. Dodatkowo, istotnym czynnikiem w badaniach starzeniowych krioizolacji jest czynnik ekonomiczny. Wyznaczanie krzywej życia krioizolacji, w szczególności helowej, jest bardzo kosztowne.

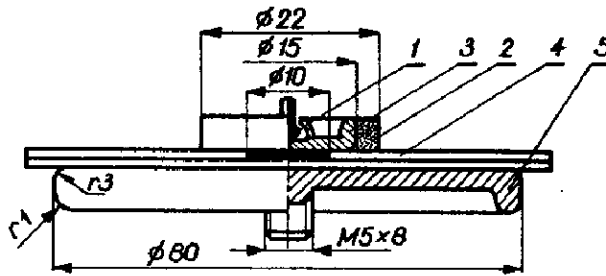
Nawiązując do powyższych zagadnień, podjęto próbę ich rozwiązania w oparciu o model degradacji sumarycznej [4,5,10]. Jednym z istotnych etapów tych prac było poznanie pewnych prawidłowości związanych z powstawaniem i intensywnością wyładowań niezupełnych w tych samych układach modelowych krioizolacji, w których miały być prowadzone badania starzeniowe. Tym zagadnieniom poświęcony jest niniejszy referat.

2. Układ elektrod i układ pomiarowy

Do badań izolacji elektrycznej w ciekłym azocie i ciekłym helu użyto dwóch zestawów sześcioelektrodowych, umożliwiających pomiary na dwunastu próbkach, przy jednym zalaniu krioostatów. Badania przeprowadzono w płaskim układzie elektrod wykonanych z mosiądzu. Zastosowano układ izolacyjny wykonany z dwóch warstw folii polietylenowej o grubości $100\ \mu\text{m}$, z otworem w warstwie przy elektrodzie napięciowej. Przyjęto możliwie dużą średnicę szczeliny / $\phi = 10\ \text{mm}$ /, umożliwiającą działanie wyładowań niezupełnych na stosunkowo dużej powierzchni dielektryku [9, 11]. Układ elektrod pomiarowych pokazano na rysunku 1.

Elektrody napięciowe, których krawędzie wyprofilowano wg krzywej Rogowskiego, zalano w specjalnej kompozycji żywicy epoksydowej, w celu wyeliminowania wyładowań krawędziowych. Jako żywicy użyto kompozycji o współczynniku rozszerzalności liniowej zbliżonym w niskich temperaturach do współczynnika rozszerzalności mosiądzu.

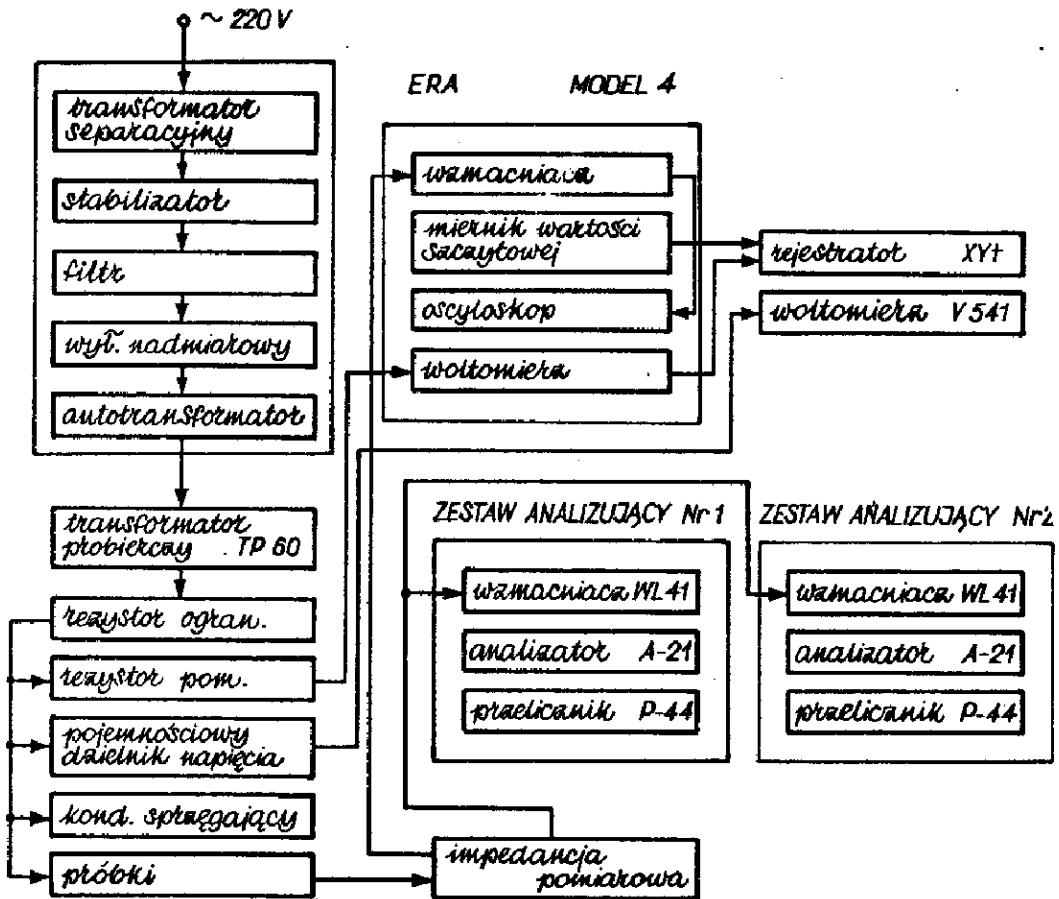
Badania wyładowań niezupełnych w izolacji polietylenowej impregnowanej ciekłym azotem i ciekłym helum wykonano w szklanych dewarach.



Rys.1. Układ elektrod do badań w ciekłym azocie i ciekłym helu.
 1 - przegub, 2 - żywica epoksydowa, 3 - elektroda napięciowa,
 4 - próbka, 5 - elektroda dolna /uziemiiona/

W przypadku pomiarów w ciekłym helu dewar helowy umieszczono w azotowym, w celu obniżenia strat ciepłych. Jako przepusty wysokonapięciowe zastosowano kable polietylenowe wolne od wyładowań do 21 kV na poziomie 1.8 pC.

Z elektrody dolnej /rys.1/ impulsy wyładowań niezupełnych doprowadzono do impedancji pomiarowej układu detekcyjnego wyładowań /rys. 2/.



Rys.2. Schemat blokowy układu do pomiaru wyładowań niezupełnych

3. Napięcie początkowe i napięcie gaszenia wyładowań niezupełnych w próbkach krioizolacji

W celu określenia parametrów prób starzeniowych dla próbek, w których pojawiałyby się i utrzymywały niegasnące wyładowania niezupełne o określonej intensywności, konieczne było wykonanie pomiarów napięć początkowych i gaszenia wyładowań generowanych w sztucznych szczelinach izolacji.

Pomiary polegały na podnóceniu napięcia na próbce z prędkością $\lambda = 14.4 \text{ kV/min.}$ do wartości 0.8 napięcia przebicia /wartości początkowej U_{p0} / i natychmiastowym obniżeniu go, z taką samą prędkością, do zera.

Za napięcie początkowe przyjmowano takie napięcie, przy którym maksymalny ładunek pozorny wynosił, w przypadku gdy impregnatem był ciekły azot - $q_x = 1.8 \text{ pC}$ i ciekły hel - $q_x = 1.1 \text{ pC}$.

Pomiary wykonano w przypadku ciekłego azotu na 24 próbkach, a w przypadku ciekłego helu - na 18 próbkach. Wyniki pomiarów opracowano wg rozkładu Weibulla, wykorzystując mediany jako wartości napięć początkowych i gaszenia wyładowań /tab. 1/.

Tabela 1

Wyniki obliczeń statystycznych napięć początkowych i gaszenia wyładowań niezupełnych generowanych w sztucznych szczelinach krioizolacji

Impregnat	$Me(U_j)$	przedziały ufnosci dla $Me(U_j)$ na poziomie $\beta=0.90$	σU_j	$Me(U_g)$	przedziały ufnosci dla $Me(U_g)$ na poziomie $\beta=0.90$	σU_g
-	kV	kV	kV	kV	kV	kV
ciekły azot	6.2	6.1 - 6.3	0.04	4.5	4.4 - 4.6	0.03
ciekły hel	2.5	2.4 - 2.6	0.03	1.5	1.4 - 1.6	0.03

Oznaczenia w tabeli 1 :

- $Me(U_j)$, $Me(U_g)$ - mediana z rozkładu napięć początkowego i gaszenia,
 σU_j , σU_g - odchylenie standardowe napięć U_j i U_g ,
 β - poziom ufnosci.

Niskie napięcie początkowe i gaszenia wyładowań niezupełnych w krioizolacji helowej w stosunku do azotowej można wiązać ze znacznie niższym ciepłem parowania ciekłego helu [8]. Inną właściwością fizyczną użytych cieczy jest to, że jednostkowy strumień energii odparowuje w jednostce czasu ok. 60 razy więcej ciekłego helu niż ciekłego azotu [8].

Taka sama moc, pochodząca np. od wyładowań niezupełnych, w szczelinach o identycznych wymiarach, znacznie szybciej odparuje tę samą objętość ciekłego helu niż ciekłego azotu. Do zainicjowania wyładowań niezupełnych w izolacji opartej o ciekły hel potrzebna jest znacznie niższa energia wyładowań niż dla krioizolacji azotowej.

4. Charakterystyki wyładowań niezupełnych

W czasie prób mierzono w badanych próbkach maksymalny ładunek pozorny wyładowań niezupełnych $q_x = f(t_g) / t_g$ - czas oddziaływania napięcia oraz wyznaczano przebiegi częstotliwości powtarzania impulsów wyładowań od ich amplitudy $n = f(Q)$.

Zależność częstotliwości powtarzania impulsów w układzie dyskryminacji od napięcia przykładanego do elektrod przedstawiono na rys. 3.

Równania funkcji potęgowych są następujące :

a/ dla krioizolacji azotowej

$$n_c = 104 U^{1.74} \quad /1/$$

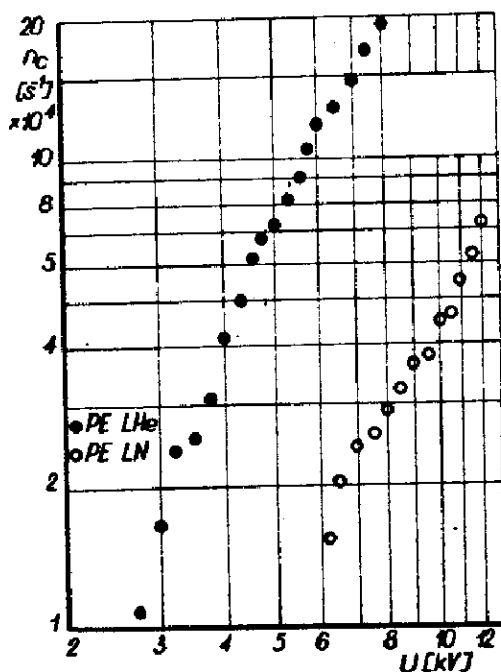
b/ dla krioizolacji helowej

$$n_c = 809 U^{1.76} \quad /2/$$

Dla obu użytych impregnatów szybkość wzrostu liczby wyładowań z napięciem jest w przybliżeniu taka sama. Może to świadczyć o podobnym mechanizmie rozwoju wyładowań w sztucznych szczelinach krioizolacji.

Liczba wyładowań dla danego napięcia jest znacznie wyższa w przypadku, gdy impregnatem jest ciekły hel. Fakt ten można tłumaczyć, przy tej samej energii wyładowań, różnym stosunkiem faz gazowych do ciekłych azotu i helu, związanym z różnym ciepłem parowania.

Przebiegi maksymalnego ładunku pozornego wyładowań niezupełnych przedstawiono na rys. 4 i 5.



Rys.3. Zależność częstotliwości powtarzania impulsów w układzie dyskryminacji od napięcia dla izolacji PE-LHe i PE-LN₂.

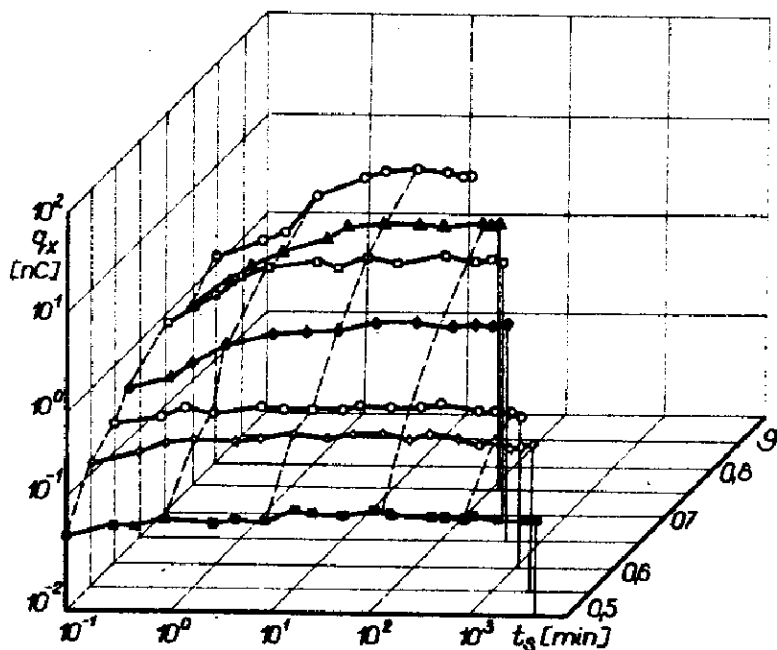
Zliczano impulsy o ładunkach : PE-LHe $q_1 > 7.5 \text{ pC}$
 PE-LN₂ $q_1 > 8.2 \text{ pC}$

Każdy punkt z rysunku 4 i 5 jest wartością mediany z rozkładu Weibulla wyznaczonej z rozkładu q_x na co najmniej 6 próbkach dla identycznych momentów czasowych. Napięcie podano w wartościach względnych, w stosunku do wytrzymałości początkowej / $g = \frac{U}{U_{p0}}$ /.

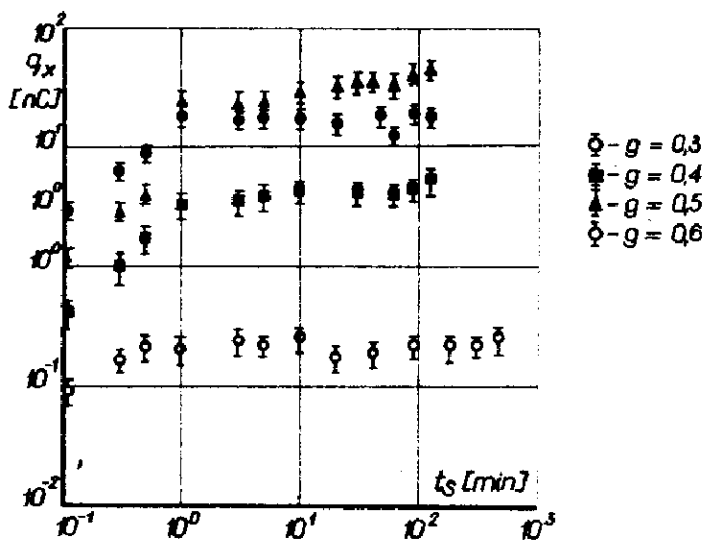
Dla wszystkich otrzymanych przebiegów $q_x(t_g)$, zarówno w ciekłym azocie jak i helu, ładunek maksymalny jest praktycznie stały w czasie. Proces ustalania się poziomu $q_x(t_g)$ w przypadku ciekłego azotu zawierał się w granicach 3 - 5 minut, a w przypadku ciekłego helu nie przekraczał jednej minuty od momentu załączenia napięcia. Poziom mierzonego ładunku dla izolacji azotowej zmieniał się w zależności od wartości napięcia od 0.05 do 10 nC, natomiast dla izolacji helowej od 0.1 do 80 nC.

W przypadku obu impregnatów maksymalny ładunek pozorny na ogół rośnie wraz ze wzrostem napięcia na próbkach. Dla tych samych względnych napięć probierczych wartość q_x jest o rząd wyższa w próbkach przesyconych ciekłym helu. Podobnie jak dla napięć początkowych i gaszenia,

fakt ten wydają się tłumaczyć właściwości fizyczne użytych kriocieczy.



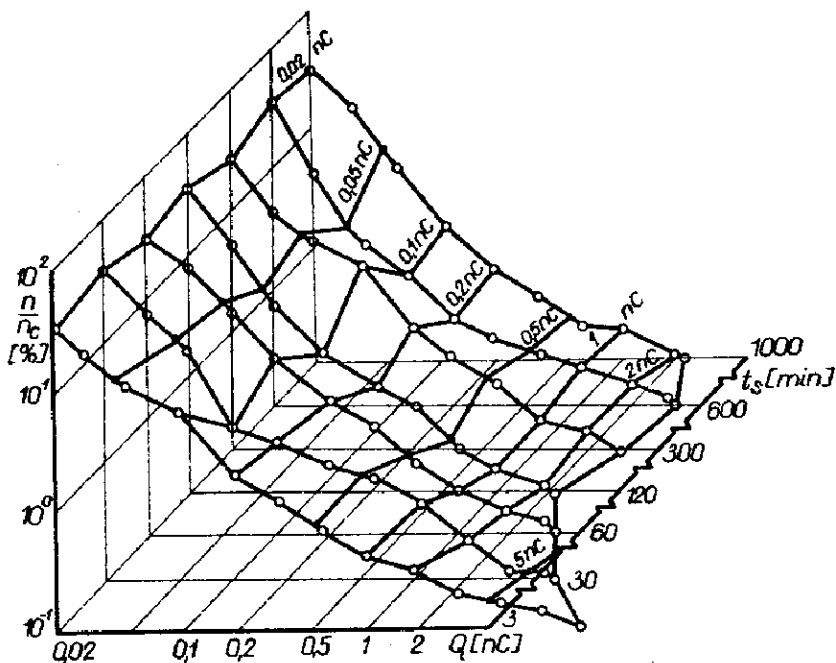
Rys.4. Przebiegi maksymalnego ładunku pozornego wyładowań niezupełnych $q_x(t_s)$ dla izolacji polietylenowej impregnowanej ciekłym azotem



Rys.5. Przebiegi maksymalnego ładunku pozornego wyładowań niezupełnych $q_x(t_s)$ dla izolacji polietylenowej impregnowanej ciekłym helumem

Napięcie początkowe wyładowań przy przesycaaniu próbek ciekłym azotem i helum wynosiło odpowiednio 6.2 i 2.5 kV /tab. 1/ lub - odniesione do wytrzymałości początkowej - 0.488 oraz 0.243. Zakładając, zgodnie z równaniami /1/ i /2/, że mechanizm rozwoju wyładowań w obu kriocieczach jest podobny, to dla tego samego napięcia maksymalny ładunek pozorny wyładowań q_x musi być wyższy w przypadku impregnatu o niższym napięciu początkowym wyładowań.

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono przykładowe funkcje gęstości rozkładu impulsów wyładowań niezupełnych w zależności od czasu działania napięcia.

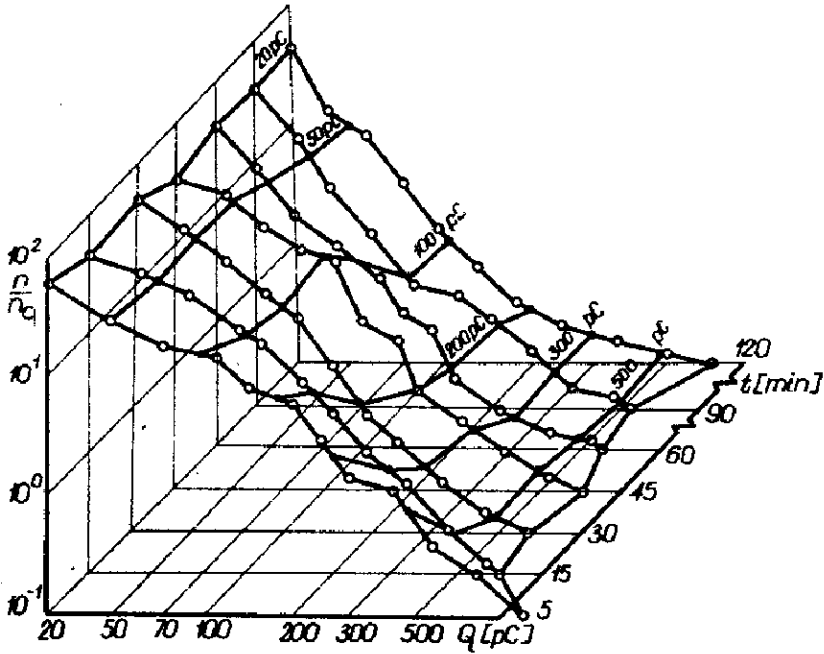


Rys.6. Funkcje gęstości rozkładu impulsów wyładowań dla izolacji PE- IN_2 przy względnym napięciu $g = 0.6$

Dla wszystkich napięć probierczych rozkład impulsów był wykładniczo opadającą funkcją ładunku, z czego wynika, że zdecydowana większość energii wyładowań była przenoszona przez impulsy o małej amplitudzie. Udział impulsów najmniejszych, o średnim ładunku w oknie analizy wynoszącym ok. 20 pC, we wszystkich impulsach w widmie, w przypadku kriozolacji helowej wynosił 65 - 80%, a dla kriozolacji azotowej - nie przekraczał 50%.

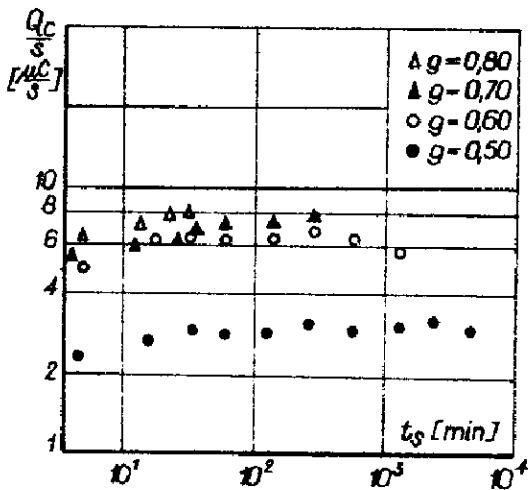
W wartościach bezwzględnych dla kriozolacji helowej liczba impulsów

najmniejszych, rejestrowanych przez aparaturę zliczającą, wynosiła w oknie analizy 20 - 90 tysięcy w jednej sekundzie, natomiast dla krioizolacji azotowej 4 - 12 tysięcy, w zależności od wartości napięcia przykładanego do elektrod.

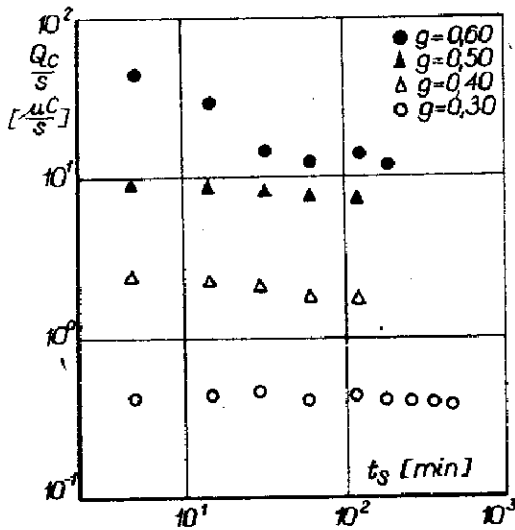


Rys.7. Funkcje gęstości rozkładu impulsów wyładowań dla izolacji PB-LiE przy względnym napięciu $g = 0,5$

Przebiegi czasowe ładunku całkowitego Q_c wyładowań niezupełnych przedstawiono na rys. 8 i 9.



Rys.8. Przebieg ładunku całkowitego Q_c w funkcji czasu działania napięcia dla krioizolacji azotowej



Rys.9. Przebieg ładunku całkowitego Q_c w funkcji czasu działania napięcia dla krioizolacji helowej

Przy impregnowaniu folii polietylenowej ciekłym azotem zakres zmienności Q_c jest stosunkowo wąski /2 - 8 μC /. Natomiast przy zastosowaniu jako impregnatu ciekłego helu wielkość Q_c zmienia się w granicach 0,3 - 60 μC .

5. Wnioski

Przeprowadzone pomiary wyładowań niezupełnych w szczelinach izolacji polietylenowej impregnowanej ciekłym azotem i ciekłym helem pozwoliły na określenie parametrów prób starzeniowych oraz prognozowanie skutków oddziaływania wyładowań na izolację polietylenową dla obu impregnatów.

Porównując mierzone wielkości wyładowań niezupełnych dla izolacji polietylenowej, gdy impregnatem był ciekły azot lub ciekły hel stwierdzono, że dla krioizolacji helowej :

1. napięcie początkowe wyładowań jest ponad dwukrotnie niższe,
2. częstotliwość powtarzania impulsów dla tej samej wartości napięcia jest kilkakrotnie większa,
3. maksymalny ładunek pozorny jest o rząd wielkości większy dla tych samych wartości napięć względnych przykładanych do elektrod,
4. udział impulsów o najmniejszym ładunku we wszystkich impulsach w widmie był większy /przy wykładniczym charakterze rozkładu/,
5. ładunek całkowity, wyznaczony w oparciu o funkcje gęstości rozkła-

du impulsów, był większy niż dla krioizolacji azotowej.

Większe wartości mierzonych parametrów wyładowań niezupełnych w przypadku krioizolacji helowej są najprawdopodobniej związane z mniejszym ciepłem parowania ciekłego helu w stosunku do ciekłego azotu, wynikiem czego jest większy udział fazy gazowej w sztucznych szczelinach krioizolacji helowej.

Konsekwencją większej intensywności wyładowań niezupełnych w izolacji polietylenowej impregnowanej ciekłym helem są większe spadki wytrzymałości z czasem starzenia, a więc i niższy wykładnik potęgowy krzywej życia, w stosunku do izolacji polietylenowej impregnowanej ciekłym azotem [2,5,11] .

Literatura

1. Aniščenko N.G., Minein V.F. : Issledovanija kratkovremennoj električeskoj pročnosti i srokov služby izblaczi v kriogennych uslovijach, PTE, No 6, 1973.
2. Breteau J.P., i inni : Dielectric properties of insulating materials at cryogenic temperatures. Int.Symp. High Volt. Insul. for Low Temp. Application, 1976 Wrocław.
3. Buliński A.T., Juchniewicz J.R. : Voltage ageing tests of layer insulation samples impregnated with liquid nitrogen, CIGRE 1974, Rep. 15-02.
4. Dubicki J., Sachajko R. : Zastosowanie modelu degradacji sumarycznej do wyznaczania napięciowych krzywych życia stałych dielektryków organicznych. III Symp. Problemy wył.niezup. w ukł. elektroizol. 1979, Zakopane.
5. Dubicki J., Sachajko R. : Próba zastosowania modelu degradacji sumarycznej do oceny wpływu wyładowań niezupełnych na wytrzymałość elektryczną długotrwałą warstwowej izolacji niskotemperaturowej. Rozprawa doktorska, 1980, Wrocław.
6. Fallou B., Breteau J.P. : Comportement diélectrique sous haute tension des structures rubanées imprégnées de fluides cryogéniques, 748/RGE, 1975, Tome 84, No 10.
7. Fukusawa M., Nagano H. : Liquid nitrogen impregnated insulation for cryogenic power cables. Cryogenics, 1974.
8. Mazurek B. : Kriogenika. Poradnik Inżyniera Elektryka. tom I, ENI. Warszawa 1974.
9. Schwenterly S.W. i inni : AC dielectric performance of helium impregnated multi-layer plastic film insulation, IEEE Int.Symp.on Electr. Insul., 1976, Montreal.

10. Simoni L. : A new approach to the voltage endurance test on electrical insulation, IEEE Trans. on Electr. Insul., 1973, Vol. EI-8, No 3.
11. Weedy B.M., Swingler S.G. : Life expectancy of liquid nitrogen impregnated taped cable insulation, IEEE Int.Symp. on Electr. Insul., 1978, Philadelphia.