

ANALIZA NIEKTÓRYCH ZAGADNIEŃ DOTYCZĄCYCH
DEGRADACJI DIELEKTRYKÓW POD WPLYWEM WYŁA-
DOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

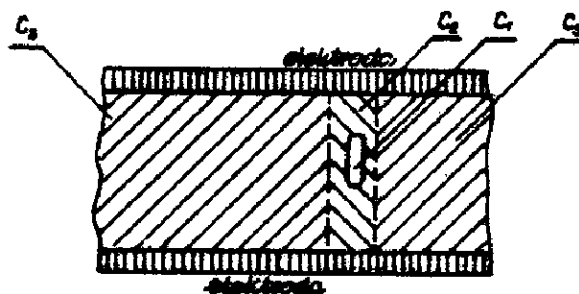
W niniejszym artykule zostanie poruszonych kilka zagadnień związanych z wyładowaniami niezpełnymi, które, jak wiadomo, stanowią jeden z czynników powodujących degradację izolacji urządzeń elektrycznych wysokiego napięcia.

Pierwszym z nich będzie analiza wskaźników intensywności wyładowań niezpełnych stosowanych do oceny stopnia zagrożenia izolacji przez wyładowania niezpełne. Muszę jednak wyjaśnić, że jakkolwiek przytoczone rozważania będą w głównej mierze odnosiły się do zjawisk związanych z erozyjnym charakterem degradacji dielektryków wskutek wyładowań niezpełnych, to nie oznacza, że autor uważa, aby ten mechanizm degradacji miał we wszystkich przypadkach dominujące znaczenie.

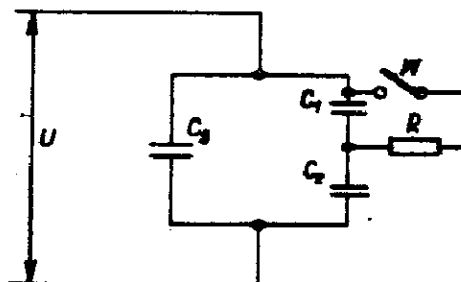
A. Ocena stosowanych wskaźników intensywności wyładowań niezpełnych.

Zewnętrzne objawy wyładowań niezpełnych wykorzystuje się do określenia ich intensywności. Należą do nich: średnia wartość ładunku pozornego, średnia z kwadratów wartości tych ładunków, średnia energia lub średni prąd doprowadzane do układu w wyniku wyładowań niezpełnych [1, 2] .

Wartość tych wskaźników ocenia się w oparciu o schemat zastępczy dielektryku zawierającego kawernę gazową, rys. 1 i 2 [3] .



Rys. 1 Fragment dielektryku z kawerną gazową



Rys. 2 Stosowany schemat zastępczy dielektryku stanowiący podstawę do określenia wartości wskaźników intensywności wyładowań

Stwierdzono, że przeskok iskry w kawernie gazowej prowadzi do obniżenia się w niej napięcia do wartości napięcia U_g nazywanego napięciem gaśnięcia, które wynosi od 0,6 do 0,8 wartości napięcia U_{1g} , tj. napięcia przeskoku w kawernie. Zatem:

$$\frac{U_{1E} - U_E}{U_{1E}} = k, \quad \text{gdzie } k = 0,2 - 0,4$$

W układach praktycznych wartość pojemności C_3 jest równa pojemności C oraz jest ona znacznie większa od pojemności C_1 i C_2 .

$$C_3 \gg C_1 \text{ i } C_3 \gg C_2/.$$

Ograniczę się do trzech podstawowych wskaźników intensywności wyładowań niezupełnych, a mianowicie:

1. Średniej z bezwzględnych wartości ładunku pozornego Q_p za jeden półokres zmian napięcia zasilającego

$$Q_{\text{sr}} = \frac{1}{T_1} \sum_{p=1}^{p=n} |Q_p|$$

gdzie: T_1 - oznacza półokres zmian napięcia zasilającego sinusoidalnego $T = 2T_1$; T - okres zmian tego napięcia,

n - liczba wyładowań w półokresie,

p - kolejny numer wyładowania.

2. Średniej z kwadratów wartości ładunków pozornych

$$Q_{\text{sr}}^2 = \frac{1}{T_1} \sum_{p=1}^{p=n} Q_p^2$$

3. Średniej energii doprowadzonej ze źródła do układu w wyniku tych wyładowań

$$E_{\text{sr}} = \frac{1}{T_1} \sum_{p=1}^{p=n} U_p Q_p$$

gdzie: U_p oznacza wartość chwilową napięcia panującego na układzie w chwili wyładowania w kawernie.

Wszystkie te wielkości będą odnoszone do jednej i tej samej kawerny.

W przypadku wielu kawern występujących w układzie izolacyjnym będzie to suma wymienionych wyżej średnich wartości. Celem podanych wyżej rozważań jest analiza najczęściej spotykanych wielkości charakteryzujących intensywność wyładowań niezupełnych w układzie izolacyjnym oraz wyciągnięcie z tej analizy wniosków przydatnych do celów praktycznych. Przechodząc do analizy wartości wymienionych intensywności wyładowań niezupełnych należy na wstępie przedstawić podstawowe zależności wynikające ze schematu zastępczego pokazanego na rys. 2.

Zgodnie z podanymi wzorami, impuls energii doprowadzony do układu w wyniku wyładowania o numerze p wynosi:

$$E_p = U_p \cdot Q_p$$

Ładunek pozorny $Q_p = C \Delta U$, gdzie ΔU oznacza spadek napięcia na układzie powstający w wyniku wyładowania, zaś

$$C = C_3 + \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

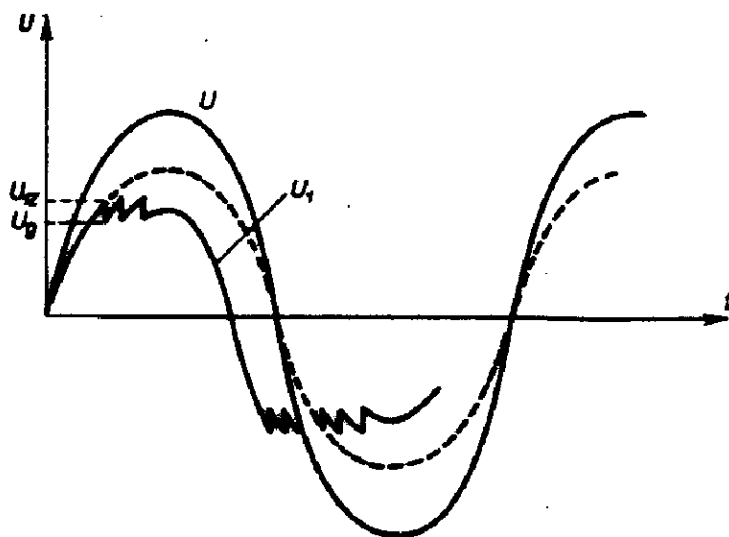
W tym samym czasie na pojemnościach C_1 i C_2 wystąpią spadki napięcia oznaczone odpowiednio ΔU_1 i ΔU_2 , przy czym zależność pomiędzy ΔU i ΔU_1 jest następująca

$$\Delta U = \Delta U_1 \frac{C_2}{C_2 + C_3}$$

zaś

$$\Delta U_1 = U_{1z} - U_g = k U_{1z}$$

Aby łatwiej zrozumieć podane niżej zależności należy przedstawić, jak zmienia się napięcie na kawernie gazowej w przypadku, gdy występują w niej wyładowania. Zmiany te pokazane są na rys. 3.



Rys. 3 Zmiany napięcia U na układzie oraz zmiany napięcia U_1 na kawernie, gdy występują w niej wyładowania. Linia kreskowaną przedstawiono napięcie, jakie panowałoby na kawernie, gdyby wyładowania w kawernie nie występowały.

Z rysunku wynika zależność pomiędzy U_1 i U - jest następująca:

$$U_{1z} + i_p U_1 = U_p \frac{C_2}{C_1 + C_2}$$

gdzie: i_p oznacza liczbę wartości U_1 , o które U_1 przesunięte jest względem wartości napięcia na kawernie, które panowałoby wówczas, gdyby nie występowały w niej wyładowania iskrowe.

Natomiast ładunek pozorny

$$Q_p = C \Delta U = C \Delta U_1 \frac{C_2}{C_2 + C_3} = k U_{1z} C \frac{C_2}{C_2 + C_3}$$

Dla danej kawerny wartość bezwzględna ładunku pozornego jest stała, nie zależy od momentu wyładowania.

W związku z tym impuls energii po wyładowaniu oznaczonym numerem p:

$$E_p = k C \frac{C_1 + C_2}{C_2 + C_3} / 1 + i_p k / \cdot U_{1z}^2$$

Impuls energii E_p można wyrazić inaczej. Ponieważ

$$Q_p = k U_{1z} \frac{C_2}{C_2 + C_3} \cdot C$$

zatem

$$U_{1z} = Q_p \frac{C_2 + C_3}{k C C_2}$$

Dlatego

$$E_p = \frac{/C_1 + C_2/ /C_2 + C_3/}{k C C_2^2} Q_p^2 / 1 + i_p k /$$

Dla tej samej kawerny wyrażenie $\frac{/C_1 + C_2/ /C_2 + C_3/}{k C C_2^2}$ jest stałe, zatem

$$E_p = \text{const } Q_p^2 / 1 + i_p k /$$

W przypadku ogólnym, gdy występuje n wyładowań w półokresie, tzn. $\frac{n}{2}$ wyładowań występuje w jednej czwartej okresu, a dalsze $\frac{n}{2}$ wyładowań występuje w następnej czwartej części okresu, wówczas składniki rozpatrywanej sumy

$$\sum / 1 + i_p k /$$

są następujące: /tablica 1/

Tablica 1Tablica wartości wyrażenia $1 + i_p k$

p	$1 + i_p k$
1	$1 + 0 k$
2	$1 + 1 k$
3	$1 + 2 k$
4	$1 + 3 k$
$\frac{n}{2}$	$1 + \sqrt{\frac{n}{2}} - 1/k$
$\frac{n}{2} + 1$	$1 - \frac{n}{2} k$
$\frac{n}{2} + 2$	$1 - \sqrt{\frac{n}{2}} - 1/k$
$\frac{n}{2} + \sqrt{\frac{n}{2}} - 2/$	$1 - 3 k$
$\frac{n}{2} + \sqrt{\frac{n}{2}} - 1/$	$1 - 2 k$
$\frac{n}{2} + \frac{n}{2}$	$1 - 1 k$

zatem

$$\sum /1 + i_p k/ = n /1 - \frac{1}{2} k/$$

W związku z tym

$$\sum E_p = Q_p^2 \frac{/C_2 + C_3/ /C_1 + C_2/}{C k C_2^2} \cdot /1 - \frac{1}{2} k/ n$$

czyli

$$\sum E_p = \text{const } n Q_p^2$$

Jest to bardzo ważne stwierdzenie, że suma kwadratów ładunków pozornych w jednym półokresie zmian napięcia równa się sumie energii doprowadzonych do układu w wyniku występujących wyładowań niezupełnych

w kawernie gazowej.

Należy zwrócić uwagę na istotną różnicę występującą pomiędzy impulsami jakie stanowią kwadraty ładunków pozornych oraz porcje energii dostarczanych ze źródła do układu w wyniku wyładowań niezupełnych w jednym półokresie zmian napięcia /w drugim półokresie zjawiska powtarzają się/..

Jeśli kwadraty ładunków pozornych pochodzące od wyładowań niezupełnych w tej samej kawernie są praktycznie jednakowe, o tyle impulsy energii mają wartości różne.

Opierając się na wzorze $E_p = \text{const } Q_p^2 / 1 + i_p k /$ można zbudować tablicę wartości impulsów energii E_p . /Tablica 2/.

Jak widać, wartości poszczególnych impulsów energii różnią się znacznie między sobą, choć suma ich w przedziale jednego półokresu jest zawsze równa sumie kwadratów ładunków pozornych dostarczanych do układu w wyniku wyładowań niezupełnych zachodzących w danej kawernie gazowej.

Z przytoczonych rozważań wynika, że wartości bezwzględnych ładunków pozornych, jak i kwadraty ich wartości są w każdym momencie wyładowania jednakowe dla danej kawerny, natomiast impulsy energii różnią się pomiędzy sobą bardzo znacznie. Co więcej, impulsy energii mogą być dodatnie lub ujemne, co wynika z podanych wyżej przykładów. Spostrzeżenie to jest bardzo ważne, ponieważ posługujemy się coraz częściej tzw. rozkładami częstotliwościowymi impulsów dotyczących całego badanego układu. W takim układzie izolacyjnym występuje wiele kawern gazowych, zatem rozkłady te dotyczą wyładowań pochodzących z wielu źródeł.

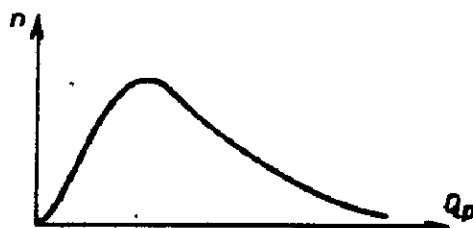
W przypadku rozkładu częstotliwościowego ładunków pozornych rozkład ten jest przedstawiony na rym. 4.

Ze wzoru na ładunek pozorny

$$Q_p = k U_{1z} C \frac{C_2}{C_2 + C_3}$$

Tablica 2 Wartość impulsów energii doprowadzonych ze źródła do układu w wyniku wyładowań niesupełnych w przypadku, gdy $U_{1m} = 1000 \text{ V}$, $U_{1m} = 1400 \text{ V}$ oraz $U_{1m} = 1800 \text{ V}$. Wartości energii podano w liczbach względnych przyjmując, że dla $p = 1$ wartość energii $E_1 = 1$.

	P	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$U_{1m} = 1000 \text{ V}$	i_p	0	1	-2	-1	-	-	-	-	-	-	-	-
	E_p	1	1,25	0,5	0,75	-	-	-	-	-	-	-	-
$U_{1m} = 1400 \text{ V}$	i_p	0	1	2	3	-4	-3	-2	-1	-	-	-	-
	E_p	1	1,25	1,5	1,75	0	0,25	0,5	0,75	-	-	-	-
$U_{1m} = 1800 \text{ V}$	i_p	0	1	2	3	4	5	-6	-5	-4	-3	-2	-1
	E_p	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	-0,5	-0,25	0	0,25	0,50	0,75



Rys. 4 Rozkład ładunków pozornych w funkcji częstotliwości ich występowania
 n - liczba wyładowań na jednostkę czasu,
 Q_p - wartość ładunku pozornego

który ten wzór można uprościć, gdyż w układach praktycznych spełnione są nierówności $C_3 \gg C_1$ oraz $C_3 \gg C_2$ wynika, że $C = C_3$, a zatem

$$Q_p = U_{1z} C_2 k$$

Wynika więc, że ładunek pozorny jest tym większy, im dalej posunięta jest erozja dielektryku, ponieważ ze wzrostem długości kawerny gazowej rośnie C_2 oraz rośnie także wartość napięcia zapłonu wyładowania U_{1z} w tej kawernie. Dlatego porównanie rozkładów ładunków pozornych w funkcji częstotliwości dla różnych czasów starzenia dielektryku wywołanego wyładowaniami niezupełnymi może być interesującym wskaźnikiem postępującej degradacji dielektryków jako objawu wspomnianego starzenia.

Z rozkładów częstotliwościowych bezwzględnych wartości ładunków wynika natomiast rozkład częstotliwościowy kwadratów wartości ładunków pozornych. Maksimum tego rozkładu występuje dla tej samej wartości ładunku pozornego. Maksimum krzywej zmian częstotliwości-

wych wartości kwadratów ładunków pozornych w porównaniu do maksimum krzywej zmian częstotliwościowych wartości tych ładunków przesuwają się w kierunku osi rzędnych.

W miarę wzrostu erozji dielektryku, to znaczy ze wzrostem wymiarów /zwłaszcza wymiaru w kierunku pola/ kawerny gazowej rośnie wartość ładunku pozornego oraz rośnie także kwadrat tej wartości.

Wnioski.

1. Suma energii dla danej kawerny jest proporcjonalna do sumy kwadratów ładunków pozornych.
2. Impulsy wartości energii dostarczane do układu w wyniku wyładowań niesupełnych zachodzących w tej kawernie wahają się w dość szerokich granicach w czasie jednego półokresu lub okresu zmian napięcia zasilającego.
3. W związku z poprzednim wnioskiem nasuwa się następny, a mianowicie, że rozkłady częstotliwościowe oparte na bezwzględnych wartościach ładunków pozornych lub ich kwadratów związane z wieloma kawernami są bardziej przejrzyste niż rozkłady częstotliwościowe impulsów energii, które to impulsy w przypadku wielu kawern o różnych wymiarach mogą być praktycznie jednakowe.
4. W miarę postępowania erozji kawerny gazowej suma energii dostarczonej do układu lub suma kwadratów ładunków pozornych w czasie jednego okresu zmian napięcia zasilającego rosną szybciej, niż suma bezwzględnych wartości tych ładunków, co lepiej może wskazywać na postępującą degradację dielektryku jeśli związana jest ona z erozją poszczególnych kawern.

Następnym zagadnieniem, w którym autorowi chodziło nie tyle o obliczenie dokładnych wartości długości życia izolacji w przypadku, gdy wartość ta jest związana z erozyjnym działaniem wyładowań niesupełnych lecz chodziło o to, aby wykazać o jakich parametrów i w jaki sposób zależy w tym przypadku czas życia izolacji.

B. Ocena długości życia dielektryku przy założeniu, że decydującym długotrwałym mechanizmem jego degradacji jest mechanizm erozyjny działania wyładowań niezupełnych.

Od dawna panuje pogląd, że wyładowania występujące w kawernach gazowych zawartych w dielektryku zapoczątkowują jego degradację. Polega ona na stopniowej erozji dielektryku doprowadzając w końcu do jego przebicia.

Istnieje także inny pogląd na mechanizm przebicia dielektryków narażonych na działanie wyładowań niezupełnych, ale pogląd ten wymaga jeszcze wszechstronnego sprawdzenia. Autor nie zamierza przesądzać o tym, że mechanizm erozyjny ma decydujące znaczenie we wszystkich przypadkach starzenia dielektryku wskutek wyładowań niezupełnych. Pragnie jednak dla tych przypadków, w których erozja ma dominujące znaczenie wykazać jak zależy wówczas długość życia np. stosowanej coraz częściej syntetycznej izolacji od napięcia, przy którym ona pracuje, jego częstotliwości, podatności na erozję itp.

Ponieważ erozyjny rozwój przebicia związany jest z rozwojem wąskich kanalików o osi równoległej do kierunku pola, w związku z tym naprężenie w tych kanalikach równa się naprężeniu panującemu w sąsiedztwie dielektryku, a więc naprężeniu

$$E = \frac{U}{a}$$

U - napięcie panujące na układzie

a - grubość dielektryku

Zatem napięcie U_1 panujące na kawernie o długości x /wierzzonej w kierunku pola/ wyniesie:

$$U_1 = U \frac{x}{a}$$

Energia E_t tracona podczas pojedynczego wyładowania w kawernie

$$E_t = \frac{1}{2} C_1 / U_{1z}^2 - U_g^2 /$$

Ponieważ liczba wyładowań n na jeden okres zmian napięcia wynosi [3] :

$$n = \frac{U_1 - U_g}{U_{1z} - U_g}$$

w związku z tym energia tracona w kawernie w jednym okresie zmian napięcia E_t :

$$E_t = 2 C_1 / U_{1z} + U_g / / U_1 - U_g /$$

każ moe

$$P = \frac{E_t}{T}$$

przy czym T - oznacza okres zmian napięcia sinusoidalnego.

Zatem

$$P = 2 f C_1 / U_{1z} + U_g / / U_1 - U_g /$$

f - jest częstotliwością zmian przyłożonego napięcia,

$T = \frac{1}{f}$, pojemność $C_1 = \frac{\epsilon_1 S}{x}$, dla gazu wypełniającego kawernę

$\epsilon_1 = \epsilon \cdot \epsilon_0$; S - oznacza przekrój kanału.

Uwzględniając także zależność podaną wyżej, a mianowicie

$$\frac{U_{1z} - U_g}{U_{1z}} = k$$

oraz z niej wynikające inne zależności

$$U_g = U_{1z} / 1 - k / \quad \text{oraz} \quad U_{1z} + U_g = U_{1z} / 2 - k /$$

otrzymuje się ostatecznie

$$P = 2 \frac{\epsilon_0 S}{x} f U_{1z} / 2 - k / \left[U \frac{x}{a} - U_{1z} / 1 - k / \right]$$

Na uwagę zasługuje zależność U_{1z} w funkcji długości kawerny.

Zgodnie z przyjętymi poglądami, wartość napięcia przeskoku w kawernie gazowej /a więc pomiędzy ściankami dielektryku/ jest w przybliżeniu taka sama, jaka ma miejsce w przypadku ścianek metalowych [3] .

Autor niniejszego opracowania rozważył wartość U_{1z} dla trzech przedziałów, a mianowicie:

przedział 1 $a = 0,01 - 0,1$ mm

przedział 2 $a = 0,1 - 1$ mm

przedział 3 $a = 1 - 10$ mm

Dla tych przedziałów łatwo jest określić zależność $U_{1z} = f/x$.

Przyjęto [3] dla $x = 0,01$ mm $E_x = 400$ kV/cm,

dla $x = 0,1$ mm $E_x = 100$ kV/cm,

dla $x = 1$ mm $E_x = 45$ kV/cm,

dla $x = 10$ mm $E_x = 30$ kV/cm.

E_x - naprężenie przeskoku /wartość maksymalna/.

Dla podanych trzech przedziałów zależność $U_{1z} = f/x$ można zastąpić zależnościami typowymi dla linii prostej

$$U_{1z} = g + bx$$

Zatem zależność $U_{1z} = f/x = g + bx$ w granicach 0,01 - 10 mm zastąpić można trzema odcinkami prostymi odpowiadającymi trzem wyżej wymienionym przedziałom:

przedział 1 $U_{1z} = 333 + 6670 x$

przedział 2 $U_{1z} = 620 + 3880 x$

przedział 3 $U_{1z} = 1600 + 2840 x$

Powracając do zależności na moc traconą w kawernie gazowej oraz przyjmując zgodnie z literaturą średnią wartość dla $k = 0,3$ otrzymuje się:

$$P = 3,4 \frac{\epsilon_0 S}{x} f /g + bx/ \left[U \frac{x}{a} - /g - bx/ \cdot 0,7 \right]$$

lub inaczej

$$P = 3,4 \epsilon_0 f \frac{S}{x^2} /g + bx/ \left[/U - 0,7 ba/ x - 0,7 ga \right]$$

Z drugiej strony objętość wyerodowanego dielektryku dV można określić następująco:

$$dV = \alpha \beta P dt$$

α - określa jaka część energii $P dt$ została zużyta na erozję,

β - współczynnik erozji określa objętość wyerodowanego dielektryku na 1 dżul traczonej energii w kawernie gazowej.

Ponieważ

$$dV = S dx$$

zatem

$$S dx = 3,4 \epsilon_0 f \frac{S}{x^2} \alpha \beta /g + bx/ \left[/U - 0,7 ba/ x - 0,7 ga \right] dt$$

Z powyższej zależności wynika następujące równanie:

$$\frac{a x dx}{3,4 \alpha \beta \epsilon_0 f /U - 0,7 ba/ /g + bx/ /x - \frac{0,7 ga}{U - 0,7 ba/}} = dt$$

Jeżeli wprowadzimy oznaczenia:

$$A = \frac{0,7 ga}{U - 0,7 ba/}$$

to po scałkowaniu stronami uzyska się zależność

$$\tau = \frac{a}{3,4 \alpha \beta \epsilon_0 f /U - 0,7 ba/} \left[A \ln \frac{a - A}{x_0 - A} + \frac{g}{b} \ln \frac{g + ab}{g + bx_0} \right]$$

gdzie: x_0 - stanowi dolną granicę każdego z trzech przedziałów,

τ - określa długość życia dielektryku.

Z ostatniego wyrażenia określającego długość życia dielektryku

przy erozyjnym charakterze jego degradacji wskutek wyładowań niesu-
pełnych wynika, że wspomniana długość życia jest odwrotnie proporcjo-
nalna do częstotliwości współczynnika erozji oraz współczynnika
określającego, jaka część energii traconej w kawernie w czasie wyła-
dowania zużywana jest na erozję dielektryku.

Zależności długości życia dielektryku od napięcia oraz grubości
dielektryku występują w formie uwikłanej. W związku z tym, aby rzucić
światło również i na te zależności oraz aby pokazać do jakich wyników
liczbowych prowadzi przedstawiona zależność długości życia od różnych
parametrów zostały przeprowadzone niżej przedstawione obliczenia.
Obliczenia te zostały przeprowadzone przykładowo dla polistyrenu.

W oparciu o publikację [4] przyjęto $\alpha = 0,1$, $\beta = 1,35 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{J}$.
W związku z tym w przypadku napięcia o częstotliwości $f = 50 \text{ Hz}$ wyra-
żenie

$$\frac{a}{3,4 \alpha \beta \epsilon_0 f}$$

podzielone przez liczbę sekund przypadającą na 1 rok równa się

$$1,56 \cdot 10^8 \cdot a$$

przy czym

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4 \pi \cdot 9 \cdot 10^{12}} \text{ F/mm}$$

A oto wyniki obliczeń dla trzech wartości a :

przedział	0,01 - 0,1 mm	$x_0 = 0,01 \text{ mm}$,	$a = 0,1 \text{ mm}$
$U = 4000 \text{ V}$		$\tau = 0,8 \text{ lat}$	
$U = 6000 \text{ V}$		$\tau = 0,51 \text{ lat}$	
$U = 8000 \text{ V}$		$\tau = 0,36 \text{ lat}$	
przedział	0,1 mm x 1 mm	$x_0 = 0,1 \text{ mm}$,	$a = 1 \text{ mm}$
$U = 10000 \text{ V}$		$\tau = 11 \text{ lat}$	
$U = 20000 \text{ V}$		$\tau = 3,85 \text{ lat}$	
$U = 4000 \text{ V}$		$\tau = 1,7 \text{ lat}$	

przedział 1 mm x 10 mm	$x_0 = 1 \text{ mm}$,	$a = 10 \text{ mm}$
$U = 45000 \text{ V}$	$\tau = 52,5 \text{ lat}$	
$U = 200000 \text{ V}$	$\tau = 6 \text{ lat}$	
$U = 400000 \text{ V}$	$\tau = 2,8 \text{ lat}$	

W każdym z trzech przedziałów występuje w jednym przypadku naprężenie 40 kV/mm

przedział 1	$a = 0,1 \text{ mm}$	$U = 4000 \text{ V}$	$\tau = 0,8 \text{ lat}$
przedział 2	$a = 1 \text{ mm}$	$U = 40000 \text{ V}$	$\tau = 1,7 \text{ lat}$
przedział 3	$a = 10 \text{ mm}$	$U = 400000 \text{ V}$	$\tau = 2,8 \text{ lat}$

W związku z tym dla $a = 10 \text{ mm}$, gdy erozja dielektryku rozpoczyna się od kawerny o długości $x = 10 \mu\text{m}$, czas trwania życia dielektryku narazonego na działanie wyładowań niesupełnych przy erozyjnym charakterze mechanizmu jego przebicia - wynosi 5,3 lat. Oczywiście czas ten zależy od współczynnika d' , którego wartość przyjęto w sposób przykładowy, jednak oparty na literaturze. W obliczeniach jednak zależało na szacunkowej ocenie długości życia, a przede wszystkim chodziło o zależność jej od podstawowych wielkości napięcia, częstotliwości, współczynnika erozji itp.

Z obliczeń wydaje się pozornie zaskakujący wynik zależności długości dielektryku od jego grubości. To właśnie ostatnie zestawienie jest pozornie zaskakujące, ponieważ przy tym samym naprężeniu 40 kV/mm panującym w trzech przypadkach, a mianowicie

dla grubości dielektryku $a = 0,1 \text{ mm}$	$\tau = 0,8 \text{ lat}$
$a = 1 \text{ mm}$	$\tau = 2,5 \text{ lat}$
$a = 10 \text{ mm}$	$\tau = 5,3 \text{ lat}$

gdy erozja rozpoczyna się od jednakowej kawerny o długości $x_0 = 10 \mu\text{m}$, wzrost czasu życia okazuje się znacznie mniejszy niż wzrost grubości dielektryku, ale to daje się łatwo wytłumaczyć, jeśli weźmie się pod uwagę warstwąjącą liczbę wyładowań na sekundę w miarę postępu erozji.

W związku z tym prześledzimy, jak zmienia się ta liczba wyładowań na sekundę w trzech niżej przytoczonych przypadkach.

Przedstawione niżej rezultaty odnoszą się do tego samego napięcia panującego w dielektryku i wynoszącego 40 kV/mm.

Liczba wyładowań na sekundę n :

$$n = 4 f \frac{U_1 - U_{1z}}{U_{1z} - U_g} ; \quad \frac{U_{1z} - U_g}{U_{1z}} = k = 0,3$$

Oznaczenia podano wyżej.

1. Grubość dielektryku $a = 0,1$ mm, długość kawerny $x = 0,01$ mm

$$U_1 = 400 \text{ V}, \quad U_{1z} = 400 \text{ V}, \quad U_g = 280 \text{ V}$$

$$n = 4 f \frac{400 - 280}{400 - 280} = 200 \quad f = 50 \text{ Hz}$$

2. Grubość dielektryku $a = 1$ mm, długość kawerny $x = 0,1$ mm

$$U_1 = 4000 \text{ V}, \quad U_{1z} = 1000 \text{ V}, \quad U_g = 700 \text{ V}$$

$$n = 4 f \frac{4000 - 700}{1000 - 700} = 2200$$

3. Grubość dielektryku $a = 10$ mm, długość kawerny $x = 1$ mm

$$U_1 = 40000 \text{ V}, \quad U_{1z} = 4500 \text{ V}, \quad U_g = 3150 \text{ V}$$

$$n = 4 f \frac{40000 - 3150}{4500 - 3150} = 5460$$

Z przytoczonych obliczeń wynika, że liczba wyładowań rośnie ze wzrostem długości kawerny, która to kawerna przy większych grubościach dielektryku rośnie do większych rozmiarów, a w dodatku ze wzrostem jej długości zwiększa się także energia wyładowań, co powoduje, że czas życia dielektryku rośnie znacznie mniej niż grubość dielektryku. Przytoczone rozważania muszą mieć charakter szacunkowy, ale wnioski wynikające z nich wydają się być logiczne, a oto one.

Wnioski

1. Czas życia izolacji poddanej działaniu wyładowań niesupełnych

przy założeniu erozyjnego charakteru jej degradacji jest odwrotnie proporcjonalny do częstotliwości przyłożonego napięcia, współczynnika erozji β oraz współczynnika α' wyrażającego, jaka ilość energii traczonej w kawernie w czasie wyładowania jest zużyta na erozję.

2. Przy tym samym naprężeniu panującym w dielektryku czas życia dielektryku rośnie znacznie wolniej niż rośnie grubość dielektryku wskutek tego, że przy większych grubościach dielektryku w przypadku kawern o większych rozmiarach rośnie liczba wyładowań na jednostkę czasu oraz ich energia.

Ostatnim zagadnieniem, które pragnę poruszyć, jest porównanie udziału mocy traczonej w kawernie oraz strat dielektrycznych w sąsiadującym z nią dielektryku.

Ocena udziału strat dielektrycznych oraz mocy traczonej na skutek wyładowań niespełnych w degradacji dielektryku jest ważna nie tylko z punktu widzenia układów praktycznych, ale również i z tego powodu, że może ona dostarczyć cennych wskazówek przy badaniach długotrwałej wytrzymałości układów izolacyjnych poddawanych działaniu wyładowań niespełnych. W tym celu przy założeniu erozyjnego działania wyładowań niespełnych zostały porównane ze sobą: moc tracona w kawernie gazowej zamartej w dielektryku, zys. 1 oraz moc tracona na straty dielektryczne przypadające na powierzchnię równą powierzchni przekroju kawerny gazowej.

Rozważania analityczne

Jeśli kawerna zamarta w dielektryku ma średnicę niewielką w porównaniu do jej długości wówczas można przyjąć, że naprężenie w niej występujące jest równe naprężeniu panującemu w otaczającym ją dielektryku.

Jak łatwo stwierdzić moc P tracona w kawernie wyraża się wzorem [3] :

$$P = n \frac{1}{2} C_1 \sqrt{U_{1s}^2 - U_g^2} f$$

gdzie: n - oznacza liczbę wyładowań w ciągu jednego okresu zmian napięcia,

C_1 - pojemność kawerny gazowej zgodnie z rys. 2 ,

f - częstotliwość zmian przyłożonego napięcia do układu.

Po uwzględnieniu wyżej podanych zależności moc traczona w kawernie w wyniku wyładowań niespełnych

$$P = 3,4 \frac{\epsilon_0 S_k}{x} f \left[\frac{1}{E} - 0,7 \frac{b}{x} - 0,7 \frac{g}{x} \right] \cdot \frac{1}{g} + \frac{bx}{g}$$

ϵ_0 - oznacza przenikalność dielektryczną próżni

S_k - przekrój kawerny

x - głębokość kawerny

Straty dielektryczne P_d^i przypadające na jednostkę przekroju dielektryku w płaszczyźnie równoległej do elektrod, rys. 1, wyrażają się następującym wzorem:

$$P_d^i = \frac{2\pi f v^2 \epsilon_0 \epsilon \operatorname{tg} \delta}{a}$$

przy czym ϵ oznacza przenikalność względną dielektryku, zaś $\operatorname{tg} \delta$ stanowi współczynnik stratności dielektryku.

Straty dielektryczne P_d przypadające na powierzchnię równą powierzchni przekroju kawerny gazowej S_k wyrażają się następująco:

$$P_d = P_d^i \cdot S_k = \frac{2\pi f v^2 \epsilon_0 \epsilon \operatorname{tg} \delta}{a} \cdot S_k$$

Aby porównać ze sobą straty mocy wywołane w kawernie przez wyładowania niespełne ze stratami dielektrycznymi najwygodniej jest określić wartość ilorazu $\frac{P}{P_d}$

$$\frac{P}{P_d} = \frac{3,4 \frac{1}{g} + \frac{bx}{g} \left[\frac{1}{E} - 0,7 \frac{b}{x} - 0,7 \frac{g}{x} \right]}{2\pi a x \epsilon^2 \operatorname{tg} \delta}$$

gdzie: $E = \frac{U}{a}$

Z uzyskanej ostatniej zależności wynika, że udział strat dielektrycznych w porównaniu do strat mocy traconej w kawernie w związku z wyładowaniami niezupełnymi jest niezależny od częstotliwości przyłożonego napięcia i jest tym większy im wyższe napięcie panuje w dielektryku oraz im większa jest grubość dielektryku.

Obliczenia.

Obliczenia przeprowadzono przykładowo dla polietylenu przy trzech grubościach dielektryku, a mianowicie:

dla $a = 0,1 \text{ mm}$, $a = 1 \text{ mm}$, $a = 10 \text{ mm}$

oraz przy dwóch napięciach $E = 40 \text{ kV/mm}$ i $E = 20 \text{ kV/mm}$.

Dla każdej grubości dielektryku wyniki obliczeń podano dla trzech długości kawerny x i tak

w przypadku $a = 0,1 \text{ mm}$	$x = 0,01 \text{ mm}$,	$x = 0,05 \text{ mm}$,	$x = 0,09 \text{ mm}$
$a = 1 \text{ mm}$	$x = 0,1 \text{ mm}$,	$x = 0,5 \text{ mm}$,	$x = 0,9 \text{ mm}$
$a = 10 \text{ mm}$	$x = 1 \text{ mm}$,	$x = 5 \text{ mm}$,	$x = 9 \text{ mm}$.

Zgodnie z [5] przenikalność względna ϵ polietylenu wynosi 2,3, zaś współczynnik stratności $\text{tg} \delta = 0,0005$. Wyniki tych obliczeń dla dwóch wartości napiężeń $E = 40 \text{ kV/mm}$ oraz $E = 20 \text{ kV/mm}$ przy przyjęciu, że moc tracona na erozję P_e nie przekracza 10% mocy P podają tablice 3 i 4.

Z uwagi na to, że tylko niewielka część energii traconej w kawernie gazowej, wynosząca kilka jej procentów powoduje erozję dielektryku, udział strat dielektrycznych w degradacji dielektryku może być dość znaczny.

Należy również zwrócić uwagę na to, że autor nie uwzględnił zmian rozkładu pola zachodzących w okolicach krańców kawerny, które to zmiany rozkładu pola mają miejsce podczas wyładowań. Te zmiany napiężeń w dielektryku, występujące w czasie wyładowań w kawernie

zwłaszcza po obu jej końcach, zwiększają lokalne straty dielektryczne.

Tablica 2

Wartość ilorazu $\frac{P_g}{P_d}$ w zależności od grubości dielektryka oraz długości x kawerny gazowej przy $E = 40$ kV/mm.

Wartości a oraz x podane w mm.

$a = 0,1$	$\frac{P_g}{P_d}$	$a = 1$	$\frac{P_g}{P_d}$	$a = 10$	$\frac{P_g}{P_d}$
$x = 0,01$	1,4	$x = 0,1$	1,0	$x = 1$	0,5
$x = 0,05$	5,8	$x = 0,5$	2,8	$x = 5$	1,8
$x = 0,09$	9,0	$x = 0,9$	5,0	$x = 9$	3,0

Tablica 4

Wartości ilorazu $\frac{P_g}{P_d}$ w zależności od grubości dielektryka oraz długości x kawerny gazowej przy $E = 20$ kV/mm.

Wartości a oraz x podane w mm.

$a = 0,1$	$\frac{P_g}{P_d}$	$a = 1$	$\frac{P_g}{P_d}$	$a = 10$	$\frac{P_g}{P_d}$
$x = 0,01$	-	$x = 0,1$	1,6	$x = 1$	0,9
$x = 0,05$	8,4	$x = 0,5$	4,9	$x = 5$	3,7
$x = 0,09$	13,9	$x = 0,9$	8,2	$x = 9$	5,7

Z przytoczonych rozważań można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Stosunek strat w kawernie wówczas, gdy występują w niej wyładowania niespełne do strat dielektrycznych przypadających na przekrój dielektryka równy przekrojowi kawerny nie zależy od częstotliwości, a zależy od naprężeń panujących w dielektryku i im są one

wyższe tym stosunek tych strat jest mniejszy.

2. W miarę postępu erozji straty energii w kawernach stają się coraz większe w porównaniu do strat dielektrycznych.
3. Im cieńszy jest dielektryk tym bardziej przeważają straty w kawernie nad stratami dielektrycznymi. To w praktyce może odnosić się do kondensatorów energetycznych, w przypadku których grubość dielektryku jest rzędu 100 μm . Przy większych grubościach dielektryku np. rzędu 10 mm, co ma miejsce w przypadku kabli elektroenergetycznych, straty dielektryczne zwłaszcza w początkach erozji wywołanej wyładowaniami niezupełnymi mogą w poważnym stopniu uczestniczyć w degradacji dielektryku.

Literatura

1. Commission Electrotechnique Internationale Mesure des decharges partielles. Publ. Nr 270, 1967.
2. PN-70/E-04066: Wyładowania niezupełne w izolacji przy napięciu przemiennym. Metody badań. Warszawa, 1970, PWN.
3. Szczepański Z. - Wyładowania niezupełne w izolacji urządzeń elektrycznych. WNT, Warszawa, 1973.
4. Kostienko M., Wierszynin J.N. - Elektrofizicheskie problemy primienienia twierdych i kombinirowanych dielektrikow w technice wysokich naprażeń. Akademia Nauk SSSR, Nowosybirsk, 1974.
5. Imhof K. - Materiały elektroizolacyjne w technice wysokich napięć. WNT, Warszawa, 1963.