

Mgr inż. Olgierd de Mehlem
 Mgr inż. Leszek Palion
 Dr inż. Romuald Włodek
 Instytut Maszyn i Sterowania
 Układów Elektroenergetycznych
 Akademia Górniczo-Hutnicza

WSPÓŁCZYNNIK STRATNOŚCI DIELEKTRYCZNEJ $\operatorname{tg} \delta$
 JAKO MIARA WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

Przebieg zależności współczynnika stratności dielektrycznej $\operatorname{tg} \delta$ od napięcia jest jednym z prostych wskaźników obecności wyładowań niezupełnych w izolacji.

Jeśli występuje wyraźny punkt zmiany nachylenia krzywej $\operatorname{tg} \delta = f(U)$ to przyjmuje się w tym miejscu napięcie początku wyładowań U_0 jako jedną informację o charakterze ilościowym, nachylenie zaś krzywej, $\Delta \operatorname{tg} \delta / \Delta U$, przyjmuje się w niektórych urządzeniach jako miarę intensywności wyładowań.

Interpretacja określonego nachylenia tej zależności posiada następujące uzasadnienie teoretyczne. Straty dielektryczne, wywołane wyładowaniami niezupełnymi następują powyżej napięcia U_0 i określone są wzorem:

$$P_w = U^2 \omega C / \operatorname{tg} \delta - \frac{C^2}{\epsilon^2} \operatorname{tg} \delta_0 / \quad /1/$$

gdzie: $C, \operatorname{tg} \delta$ - wartości przy danym napięciu $U > U_0$

$C_0, \operatorname{tg} \delta_0$ - wartości przy napięciu $U < U_0$, przy którym nie występują jeszcze wyładowania niezupełne.

Z rozważań fizycznych nad modelem wyładowań w określonej prostej geometrycznie formie wtrąciny [1] wynika zależność mocy wyładowań P_w od napięcia:

$$P_w = A \cdot U_{20} / U_m - U_0 / \quad /2/$$

gdzie: U_m - wartość maksymalna napięcia na układzie
 U_0 - napięcie początku wyładowań na układzie
 U_{20} - napięcie początku wyładowań na wtrącinie
 a - stała, proporcjonalna do objętości wtrącin

Zatem nachylenie krzywej mocy wyładowań niezupełnych $\frac{dP_w}{dU}$ lub $\frac{dP_w}{dK}$ jest miarą objętości wtrącin, ulegających wyładowaniom [2] :

$$\frac{dP_w}{dK} = a \cdot \Delta U \quad /3/$$

Współczynnik stratności dielektrycznej od wyładowań $\text{tg} \delta_w$ wynosi z definicji:

$$\text{tg} \delta_w = \frac{\sum P_{wi}}{U^2 \omega C} \quad /4/$$

gdzie:

$\sum P_{wi}$ - oznacza sumowanie strat we wszystkich wtrącinach, które przy napięciu U ulegają wyładowaniom.

Na tej podstawie nachylenie krzywej $\text{tg} \delta = f(U)$, wyrażone jako $\Delta \text{tg} \delta / \Delta U$ przyjmowane jest jako miara objętości wtrącin w izolacji.

Metoda ta znalazła szczególne zastosowanie w izolacji generatorów wysokiego napięcia [2,3,4,5.] Przy pomocy wskaźnika $[\Delta \text{tg} \delta / \Delta U]_{\max}$ ocenia się jakość wykonanej izolacji pod względem jej struktury, to znaczy zwartości układu dielektryku uwarstwionego stałego i zawartości niepożądanych wtrącin gazowych. Dla jednoznacznego określenia struktury izolacji tą metodą potrzebne są jednak pomiary sprawdzające, gdyż podane wyżej związki ze względu na skomplikowany rozkład wtrącin w izolacji i napięć początkowych można traktować bezpośrednio jako informację o charakterze jakościowym [5] . Zjawiska samowygaszania wyładowań na początku działania napięcia komplikują interpretację wyników, lecz istnieją wskazania co do sposobów przeprowadzenia pomiarów, aby uwzględnić to zjawisko [6] . Istnieje zresztą

w zakresie wartości $\operatorname{tg} \delta$ duża różnorodność wymagań dla izolacji maszyn elektrycznych na terenie międzynarodowym, i tak na przykład dopuszczalne wartości $\Delta \operatorname{tg} \delta / \Delta U$ w poszczególnych krajach wynoszą od $1,1 \cdot 10^{-3}$ do $5,8 \cdot 10^{-3}$ [2]. Propozycje normalizacji w Polsce w tym zakresie podają wartości $\Delta \operatorname{tg} \delta_m / 0,1 U_n$ od 4,0 do $7,0 \cdot 10^{-3}$, zależnie od rodzaju izolacji i liczności elementów spełniających dane wymagania [7]. Należy zwrócić uwagę, że określenie dopuszczalnych wartości powyższego wskaźnika jako miary zawartości gazu ma w izolacji maszyn elektrycznych podwójne znaczenie: po pierwsze ze względu na niszczące działanie wyładowań elektrycznych we wtrącinach na sąsiedni materiał, po drugie ze względu na wzrost oporności cieplnej izolacji uzwojenia ze wzrostem zawartości wtrącin. Można w każdym razie uważać, że w przypadku generatorów ocena jakości izolacji za pomocą pomiaru $\operatorname{tg} \delta$ ma dobre uzasadnienie. Przyczynia się do tego również konstrukcja układu izolacyjnego, który zawiera tylko materiał stały a powstające z przyczyna technologicznych i eksploatacyjnych szczeliny powietrzane posiadają formy geometryczne, które można z przybliżeniem zastąpić modelowymi.

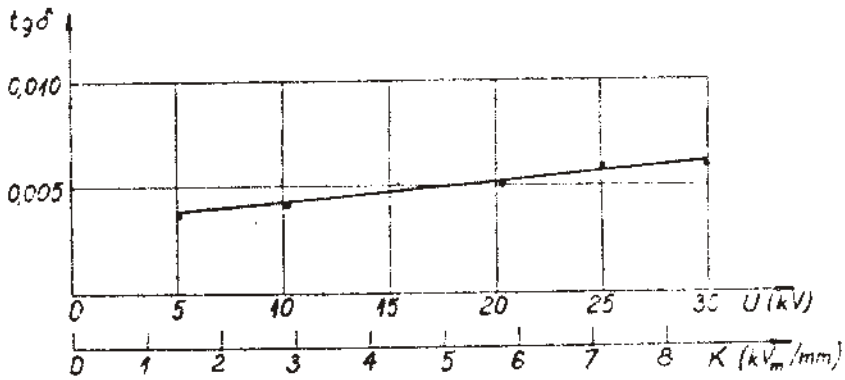
Przebieg zależności $\operatorname{tg} \delta = f/U$ był również od dawna stosowany do oceny jakości układów izolacyjnych z materiałów organicznych nasyconych, w kablach, kondensatorach, izolatorach przepustowych. I tu również występowanie załamania krzywej i wartość jej nachylenia wykorzystywane są do oceny izolacji lub jej zmian w eksploatacji. W przypadku dużych obiektów, na przykład odcinków fabrykacyjnych kabli, współczynnik stratności dielektrycznej $\operatorname{tg} \delta$ jako wielkość średnia z poszczególnych elementów układu izolacyjnego, nie posiada na ogół wyraźnie występującego punktu zmiany nachylenia w funkcji napięcia. Dlatego jako miarę nachylenia przyjmuje się w uproszczeniu różnicę $\operatorname{tg} \delta$ przy dwu różnych napięciach pomiarowych, z których niższe musi być na pewno w zakresie nie powodującym pesz-
cze wyładowań. Taki sposób kwalifikacji stosowany jest od dawna

w różnych przepisach odbioru kabli. I w tym zakresie wymagania są dość różnorodne, zarówno pod względem wartości napięć pomiarowych jak i dopuszczalnych przyrostów $\text{tg} \delta$. Należy zwrócić uwagę, że wartość napięcia pomiarowego górnego ma przy tym istotne znaczenie ze względu na natężenie pola elektrycznego, przy którym dokonuje się pomiaru. Dla przykładu normy polskie i VDE określają dopuszczalny przyrost $\text{tg} \delta$ od $2 \cdot 10^{-3}$ do $5 \cdot 10^{-3}$, zależnie od rodzaju kabla i napięcia znamionowego, normy GOST - od $2,5 \cdot 10^{-3}$ do $8 \cdot 10^{-3}$ przy czym obejmują wymaganiami już kable od napięcia znamionowego 6 kV. Można przypuszczać, że izolacja z papieru nasyconego o budowie bardziej złożonej niż izolacja ze stałego materiału i o bardziej urozmaiconych formach wyładowań niezupełnych stwarza większe trudności w określeniu dopuszczalnego przyrostu $\text{tg} \delta$ jako miary jakości. Przyczynia się do tego również rozłożona liniowo budowa takiego układu izolacyjnego, w którym wystąpienie pojedynczego niejednorodnego miejsca wywiera mały wpływ na $\text{tg} \delta$, z drugiej natomiast strony współczesna technologia suszenia i nasycania zapewnia stosunkowo dobre własności w całej izolacji. Ze względu na fakt, że przyczyną fizyczną, wywołującą wyładowania jest pole elektryczne, wymagania w zakresie przyrostu $\text{tg} \delta$ powinny być możliwie jednakowe przy porównywaniu takich samych wartości natężenia pola elektrycznego.

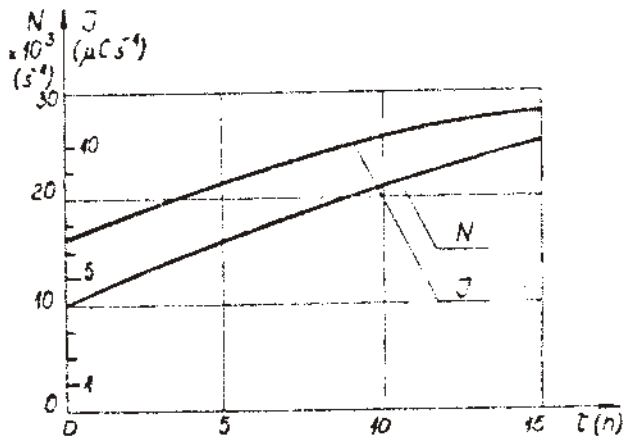
Wyładowania, rozwijające się w izolacji mogą nie zostać wogóle wykryte pomiarem $\text{tg} \delta$. Na rys.1 podano jeden z takich przykładów.

Jest to przypadek stopniowego rozwoju wyładowań w kablu elektroenergetycznym o kilkumetrowej długości. Zależność $\text{tg} \delta = f/U$ nie wykazała przebiegu dyskwalifikującego według aktualnie przyjętych w tym zakresie wskazań.

Po około 13 godzinach działania wyładowań nachylenie krzywej $\text{tg} \delta = f/U$ wynosiło $0,08 \cdot 10^{-3}/\text{kV}$ lub $0,28 \cdot 10^{-3}/\text{kV}/\text{mm}$. W takim stanie przerwana próba wykazała wyraźne ślady wyładowań w izolacji.



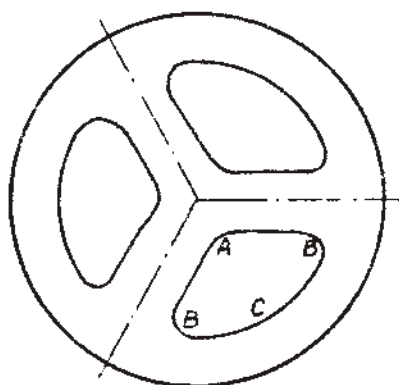
Rys.1. Zależność $\text{tg}\delta = f/U$ w kablu przy rozładowujących się wyładowaniach.



Rys.2. Zmiana w czasie średniego prądu I oraz częstości powtarzania impulsów N pod działaniem napięcia.

Na rys.2 przedstawiony jest przebieg zmian w czasie średniego prądu wyładowań I oraz częstości powtarzania impulsów N.

Z drugiej strony natomiast istnieją wyniki świadczące, że mimo przebiegu $\operatorname{tg} \delta = f/U$ o takim kształcie, który według niektórych przepisów zalicza izolację do niewłaściwych, wyładowania zmniejszają swą intensywność i wykazują tendencję do zaniku po dłuższym działaniu napięcia. Wykonano w tym celu badania w izolacji kabli na napięcie 10 kV /rys.3/, które nie były dotąd objęte wymaganiami polskich przepisów. Zastosowano do nich kryteria według GOST.



Rys.3. Przekrój kabla z tyłami sektorowymi z zaznaczeniem charakterystycznych punktów do wyznaczenia rozkładu pola elektrycznego.

Przeprowadzone pomiary rozkładu natężenia pola elektrycznego w izolacji, w obu przypadkach: w warunkach roboczych i w warunkach próby napięciowej dały wyniki natężenia pola elektrycznego zestawione w tabelicy 1.

Tablica 1

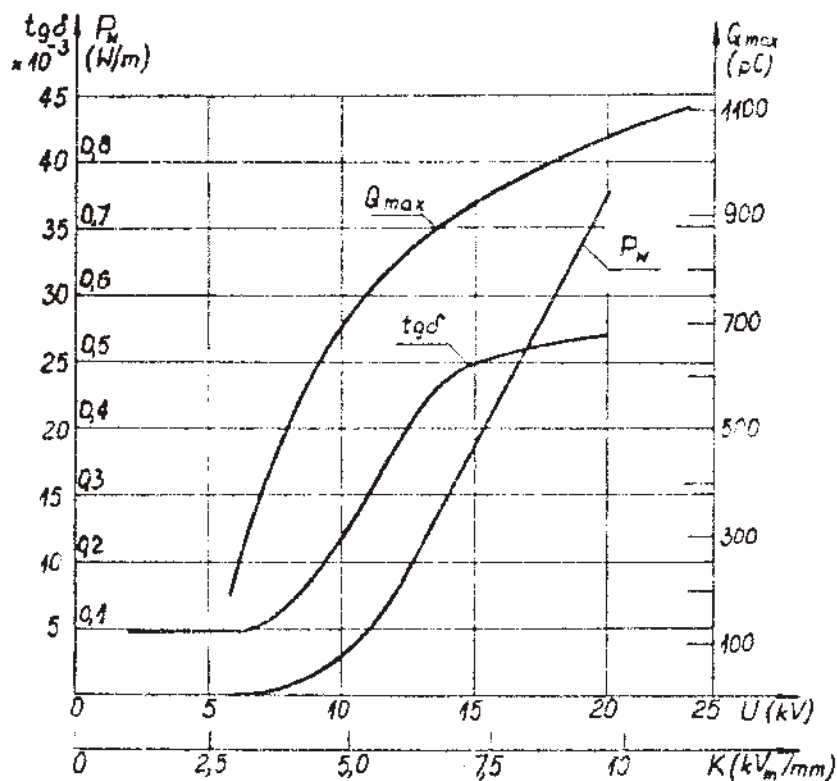
Wartości natężenia pola elektrycznego K w kablu 10 kV 120 mm²
o przekroju żył sektorowym /rys.3/

Stan działania napięcia	K / kV _{max} /mm /			U /kV/
	A	B	C	
warunki robocze	4,5	4,5	2,0	10
próba napięciowa ż/żż + ziemia	9,7	9,7	5,0	20

W kablach tego rodzaju dodatkowym zastrzeżeniem warunków pracy może być składowa natężenia pola elektrycznego styżna do warstw izolacji. W przedstawionym na rys.4 przykładzie jednego z wielu podobnych wyników przyrost $tg \delta$ wynosił 0,018 /dopuszczalny 0,006/ między napięciami pomiarowymi 5 i 20 kV. Obliczone straty mocy wyładowań niezupełnych P_w w funkcji napięcia wykazują w początkowym zakresie przebieg w przybliżeniu potęgowy, poczem liniowo zwiększają się ze wzrostem napięcia. Działanie napięcia powodowało stopniowe zmniejszenie się intensywności wyładowań, co widoczne jest w zmianach rozkładu liczby ładunków /rys.5/ oraz w zmianach średniego prądu i częstotliwości powtarzania impulsów /rys.6/.

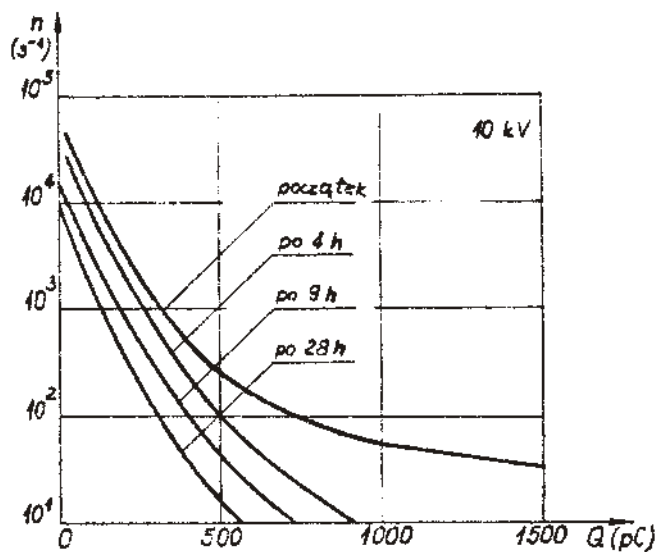
Tak więc mimo znacznego nachylenia krzywej $tg \delta = f/U$ zjawiska nie przybrały charakteru rozwijającego się w czasie.

Można zatem uważać, że problem właściwego przyjęcia kryterium dopuszczalnej zmiany współczynnika stratności dielektrycznej $tg \delta$ z napięciem wymaga w izolacji papierowo-olejowej dalszych badań.

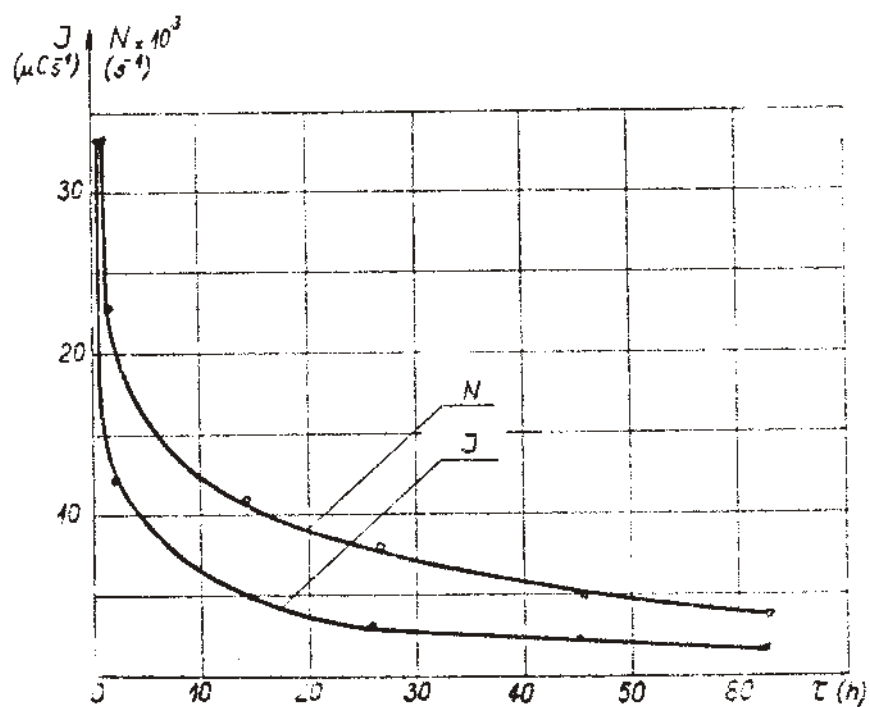


Rys.4. Zależność $\text{tg}\delta$, mocy wyładowań P_w i maksymalnego ładunku Q_{max} od napięcia.

Zagadnienie to ma dość istotne znaczenie ekonomiczne, gdyż po pierwsze, jak wykazała analiza dość dużej /ponad 1000 / liczby odcinków fabrykcyjnych kabli na napięcie 10 kV według kwalifikacji GOST, spełnienie wymagania $\Delta \text{tg}\delta$ stwarza znaczne trudności. Po drugie, kable z izolacją rdzeniową na napięcie 6 kV są podstawą budowy sieci przemysłowych, w których pewność zasilania ma duże znaczenie.



Rys.5. Zmiana w czasie rozkładu liczby ładunków.



Rys.6. Zmiana w czasie średniego prądu I oraz częstości powtarzania impulsów-pod działaniem napięcia

Wnioski

Aktualne kryteria współczynnika stratności dielektrycznej jako miary intensywności wyładowań w izolacji papierowo-olejowej nie są dostatecznie uzasadnione z punktu widzenia współczesnych badań zjawiska w tym typie izolacji.

Badania w tym zakresie powinny uwzględniać wpływ konstrukcji układu izolacyjnego i rozkładu pola elektrycznego na możliwe formy wyładowań.

Literatura

1. Kojkow S.N., Cikin A.N. - Elektrischeskoje starienije twierdych dielektrikow i nadiežnost dielektrischeskich dietali. Energija, Leningrad 1968.
2. Edwin K.W. - Die Bedeutung der Abnahmeprüfung an Generator - Hochspannungswicklungen. ETZ-A, 1963, nr.17.
3. Meyer H. - Zur Bedeutung von Verlustfaktorkenngrößen für Wicklungsisolierungen elektrischer Maschinen. ETZ-A, 1962 nr.2.
4. Gotszaik R. - Pomiar strat jonizacji w izolacji generatorów wysokiego napięcia. Rozprawa doktorska, Wrocław 1962.
5. Lechowski Z. - Wymagania dla izolacji uzwojeń stojanów dużych maszyn. Energetyka. Biuletyn I.En. 1970 nr.5/6.
6. Lechowski Z., Tułodziecka E. - Samowygaszania wyładowań niezupełnych w izolacji maszyn elektrycznych. Energetyka. Biuletyn I.En. 1971 nr. 1/2
7. Lechowski Z., Rzczyńska B. - Warunki postępu w izolowaniu uzwojeń stojana dużej mocy.
8. Leschanz A. - Isolationsüberwachung und Regeneration an Strom - und Spannungswandlern. EulM 1965 nr.6

8. Florowska B. - Badanie wyladowań częściowych w izolacji papiero-
wo-olejowej kabli elektroenergetycznych metodą analizy
impulsów napięciowych. Rozprawa doktorska AGH, Kraków
1968.
9. Dakin T.W. - The relation of Capacitance increase with high
voltages to internal electric discharges and discharging
voir volume. Tr.IEE Pow.App. 1959 October.