

WITOLD PAPUŻYŃSKI

Katedra Elektrotechniki Teoretycznej

OCENA STANU IZOLACJI KABLI NA PODSTAWIE POMIARU  
ILOZYNU RC

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono metodę oraz dość prostą aparaturę, służącą do oceny stanu izolacji kabli, na podstawie jednoczesnego pomiaru pojemności i oporności izolacji. Pomiar dokonywany jest w czasie próby napięciowej, a wskaźnikiem stanu izolacji jest iloczyn zmierzonych wielkości RC.

Proponowana metoda daje wskaźnik oceny stanu izolacji niezależny od długości kabla.

Wprowadzenie

Kable elektroenergetyczne oddawane do eksploatacji, zarówno nowe jak i już eksploatowane ale po dłuższej przerwie ruchowej, poddawane są próbie napięciowej.

Podstawowym celem próby napięciowej jest sprawdzenie wytrzymałości elektrycznej izolacji i niedopuszczenie do eksploatacji kabli z uszkodzoną czy osłabioną izolacją.

Obowiązujące w naszym kraju przepisy [1, 2] przewidują, że kabel nadaje się do eksploatacji, jeżeli jego izolacja wytrzymała bez przebicia, w czasie 10 minut przewidziane przepisami napięcie probiercze.

Kable których wskaźniki izolacji, tj. wielkości charakteryzujące stan izolacji, nie mieszczą się w przewidzianych przepisami granicach, a mianowicie:

- 1)  $I_p$  - prąd przewodnościowy  $> 300 \mu A/km$ .
- 2) Stosunek maksymalnego do minimalnego prądu przewodnościowego jest większy od dwóch.
- 3) Prąd przewodnościowy wzrasta w ostatnich 4 minutach próby napięciowej.

Kable takie mogą być dopuszczone do eksploatacji jeżeli przedłużona do 20 minut próba napięciowa nie spowoduje przebięcia izolacji.

Instrukcja eksploatacji elektroenergetycznych linii kablowych [2] uznając badania profilaktyczne za mało efektywne i nie dostatecznie uzasadnione ekonomicznie i technicznie, przewiduje przeprowadzenie tych badań, jedynie w odniesieniu do linii bardzo ważnych ruchowo.

Wydaje się, że zbyt małej efektywności badań profilaktycznych należy się doszukiwać co najmniej w dwóch przyczynach.

- 1) Zbyt niskie wartości napięć probierczych.
- 2) Stosowane wskaźniki izolacji dają małą dokładność oceny stanu izolacji kabli.

Zagadnienie wartości napięć probierczych zostało omówione przez autora w artykule "Wpływ zjawisk jonizacyjnych w izolacji papierowo - olejowej kabli na dobór napięć probierczych" [3] i w niniejszym artykule omawiane nie będzie.

Wskaźnik izolacji, oceniający stan izolacji na podstawie charakteru prądu przewodnościowego i niedopuszczający wzrostu  $I_p$  w ostatnich minutach próby napięciowej, o ile nie zostanie zakłócony wahaniami napięcia w sieci, jest wskaźnikiem niezbyt dokładnym, ale nie nasuwającym zastrzeżeń.

Wskaźnik oceniający stan izolacji na podstawie porównania prądów przewodnościowych poszczególnych żył, posiada pewną wartość jedynie w przypadku kabli trójfazowych, informując o osłabieniu izolacji jednej z żył.

W przypadku kabli rdzeniowych, istnieje raczej małe prawdopodobieństwo, aby uszkodzenie izolacji jednej żyły nie odbiło się na stanie izolacji pozostałych żył, co daje w efekcie praktycznie jednakowy prąd przewodnościowy dla wszystkich żył kabla.

Wskaźnik pierwszy, dotyczący dopuszczalnych wartości prądów przewodnościowych na jednostkę długości, kryje w sobie możliwości mylnej oceny, względnie mało dokładnej oceny stanu izolacji.

Możliwości te spowodowane być mogą następującymi czynnikami:

- 1) Brak dokładnej znajomości długości kabla.
- 2) Nieuwzględnienie wymiarów geometrycznych, związanych z budową, przekrojem żył i napięciem znamionowym kabla.
- 3) Nieuwzględnienie wpływu temperatury izolacji.

Czynnik pierwszy staje się szczególnie ważny w przypadku linii starszych czy wielokrotnie przerabianych.

Czynnik drugi jest trudny do uwzględnienia, gdyż brak jest danych podających wpływ wymienionych czynników na wartość prądu przewodnościowego.

Czynnik trzeci może rzutować na wyniki pomiarów np. w przypadku wpływu sąsiednich kabli ułożonych we wspólnym kanale, wpływu instalacji ogrzewczych, a także przewodności cieplnej gruntu.

Wyeliminowanie wpływu temperatury na wyniki pomiaru prądu przewodnościowego jest trudne do zrealizowania. Natomiast zaproponowana poniżej metoda, po przez wprowadzenie nowego wskaźnika izolacji, pozwala całkowicie wyeliminować wpływ wymiarów geometrycznych kabla, w tym również jego długości, na nowy wskaźnik oceny stanu izolacji będący funkcją prądu przewodnościowego.

#### Pośrednie wyeliminowanie wpływu wymiarów geometrycznych kabla na wskaźnik dopuszczalnego prądu przewodnościowego

Obliczenie prądu przewodnościowego czy oporności na jednostkę długości jest wówczas słuszne i celowe, jeżeli znana jest dokładna długość kabla. Dokładne wyznaczenie długości kabla ułożonego w ziemi, jest bardzo kłopotliwe.

W przypadku porównywania prądów przewodnościowych kabli o różnych konstrukcjach, dochodzi jeszcze konieczność uwzględniania poprzecznych wymiarów geometrycznych kabla tj. średnicy żył i grubości izolacji. Uwzględnienie tych czynników sprawia, że pomiary i obliczenia stają się tak złożone że tracą sens techniczny.

Zaproponowana poniżej metoda polegająca na rozszerzeniu próby napięciowej dodatkowym pomiarem pojemności kabla C, pozwala ostatecznie wyeliminować wpływ podłużnych (1) i poprzecznych wymiarów geometrycznych kabla, co prawda nie na wartość prądu przewodnościowego ale nowego wskaźnika izolacji RC który jest funkcją prądu przewodnościowego.

Wynika to z zależności

$$R = \frac{U_p}{I_p}$$

gdzie:

$U_p$  - napięcie próbierze.

Oporność izolacji kabla obliczona analitycznie jest funkcją oporności właściwej  $\rho$ , długości  $l$  i dla najprostszego pod względem budowy kabla o polu promieniowym, stosunku promieni zewnętrznego  $r_2$  do wewnętrznego  $r_1$  izolacji

$$R = \rho \frac{l}{2\pi l} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad [\Omega] \quad (1)$$

Pojemność kabla oblicza się analitycznie wg wzoru:

$$C = \frac{\epsilon \cdot 2\pi \cdot l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad [F] \quad (2)$$

Uzyskany z pomnożenia wzorów 1 i 2 iloczyn jest niezależny od długości

$$RC = \epsilon \rho = \epsilon_w \epsilon_0 \rho \quad [\Omega F] \quad \text{lub} \quad [S] \quad (3)$$

Iloczyn RC jest jedynie funkcją parametrów dielektrycznych  $\epsilon_w$  oraz  $\rho$  badanego kabla.

Wskaźnik RC w przypadku izolacji papierowo-olejowej będzie jednocześnie, jak się wydaje mniej zależny od zmian temperatury. Wynika to z następujących zależności.

Oporność właściwa izolacji maleje w funkcji temperatury wg zależności:

$$\rho_t = \rho_0 \cdot e^{-\alpha (t - t_0)} \quad (4)$$

$\rho_t$  i  $\rho_0$  to oporność właściwa izolacji zmierzona w temperaturze  $t$  oraz temperaturze  $0$  - odniesienia. Współczynnik temperaturowy oporności izolacji papierowo-olejowej wg (4) waha się w granicach

$$\alpha = 0,04 - 0,08 \quad \text{dla} \quad \rho = 10^{17} \div 10^{15}$$

Jednocześnie stała dielektryczna izolacji kablowej papierowo-olejowej rośnie wykładniczo w funkcji temperatury wg zależności

$$\epsilon_t = \epsilon_0 \cdot e^{\beta (t - t_0)}$$

Wykładnik potęgi  $\beta$  obliczony na podstawie wykresu zaczerpniętego z (5) wynosi

$$\beta = 0,003$$

Wynika stąd wniosek że temperaturowy współczynnik iloczynu RC będzie nieco niższy od współczynnika  $\alpha$ . Zagadnienie to wymaga jednak jeszcze dokładniejszego zbadania.

#### Pomiar pojemności kabla

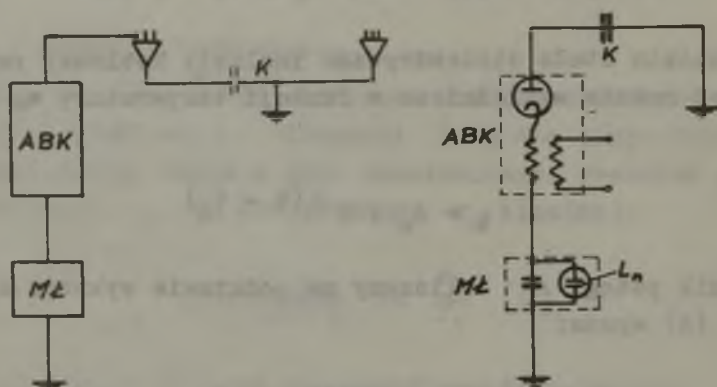
Propozycje rozszerzenia czy zmian pomiarów eksploatacyjnych spotykają się zazwyczaj z niechęcią i słusznymi skąd inąd zarzutami o konieczności posiadania nowej często kosztownej aparatury. Proponowana poniżej metoda pomiaru pojemności kabla C, wydaje się być metodą stosunkowo prostą, a co ważniejsze dzięki wykorzystaniu aparatury stosowanej do prób napięciowych kabli np. ABK 45 uzupełnionej prostą przystawką, możliwą do wyko-

nania praktycznie w każdym warsztacie elektrycznym, nie wymaga wprowadzania dodatkowej aparatury pomiarowej.

Zasada proponowanego pomiaru pojemności  $C_1$  polega na wyznaczeniu ładunku  $Q$  przepływającego przez aparat ABK w czasie ładowania badanego kabla napięciem probierowym  $U_p$

$$Q = C_1 U_p$$

Uproszczony schemat układu pomiarowego przedstawiony jest na rys. 1.



Rys. 1. Uproszczony schemat układu pomiarowego

Oznaczenia: ABK - aparat do prób napięciowych kabli, MŁ - miernik ładunku o pojemności  $C_2$ , K - badany kabel o pojemności  $C_1$ ,  
Ln - odgromnik telefonizny

Układ, przedstawiony ideowo i schematycznie na rys. 1, składa się z badanego kabla o pojemności każdej żyły w stosunku do dwóch pozostałych żył i ziemi  $C_1$ , aparatu do badania kabli np. ABK 45, którego odizolowany (drobna przeróbka) od korpusu zacisk uziemiający połączony jest z miernikiem ładunku MŁ. Miernik ładunku w najprostszym wykonaniu składa się z kondensatora o pojemności  $C_2$  oraz odgromnika telefoniznego (lampa neonowa) Ln.

Działanie układu jest następujące, po włączeniu aparatu ABK do sieci, w czasie powolnego podnoszenia napięcia probierowego,

kabel zaczyna się ładować, przy czym ładunek  $Q = i t$  dostarczony badanemu kablowi jest identyczny z ładunkiem zgromadzonym na pojemności  $C_2$ . Z chwilą gdy napięcie na kondensatorze  $C_2$  osiągnie wartość równą napięciu zapłonu odgromnika, włączonego równolegle do pojemności  $C_2$ , nastąpi wyładowanie pojemności  $C_2$  poprzez odgromnik i rozpocznie się następny cykl ładowania pojemności  $C_2$  oraz dalsze ładowanie pojemności  $C_1$ .

Wiedząc ilość zadziałań "n" odgromnika  $Ln$  oraz znając jego napięcie zapłonu  $U_z$  jak również pojemność  $C_2$ , łatwo można wyznaczyć ładunek  $Q = C_2 U_z \cdot n$

Pojemność badanego kabla

$$C_1 = \frac{Q}{U_p} = \frac{C_2 \cdot U_z \cdot n}{U_p} \quad (5)$$

Wyniki pomiarowe uzyskane za pomocą układu przedstawionego na rys. 1 wymagają skorygowania wzoru (5) z uwagi na fakt, że z chwilą zapłonu odgromnika napięcie na pojemności  $C_2$  nie spada do zera, a jedynie do wartości  $U_g$  tj. napięcia gaszenia odgromnika, które jest rzędu kilkudziesięciu a nawet kilkuset wolt w zależności od typu odgromnika i wartości prądu płynącego przez odgromnik w momencie wyładowania. Dlatego też znacznie dogodniej jest zamiast korygowania wzoru (5) do postaci

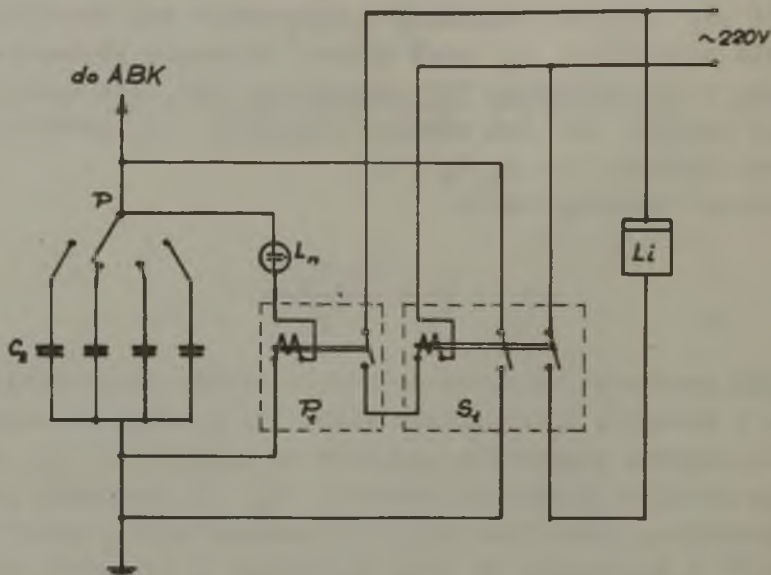
$$C_1 = \frac{C_2 (U_z - U_g) n}{U_p}$$

włączenie do obwodu wyładowczego odgromnika cewki przekąźnika, sterującego obwód stycznika który zwiera okładziny kondensatora  $C_2$ , dając tym samym pewne i całkowite rozładowanie tej pojemności.

Włączenie dość znacznej indukcyjności cewki przekąźnika do obwodu wyładowanego, ograniczając prąd wyładowczy, ułatwia i czyni bardziej stabilną pracę odgromnika  $Ln$ .

Schemat rozszerzonego układu licznika ładunków przedstawia rys. 2.

Wykorzystując kontakty styżownika, łatwo można uruchomić licznik rejestrujący liczbę wyładowań "n".



Rys. 2. Rozszerzony schemat układu licznika ładunku

P - czterozakresowy przełącznik pojemności  $C_2$ ,  $L_n$  - odgromnik telefoniczny,  $P_t$  - przekaźnik,  $S_t$  - styżownik,  $L_i$  - licznik zadziałań

Zmontowany w układzie  $M_1$  czterostopniowy przełącznik P umożliwia, poprzez zmianę pojemności  $C_2$ , pomiar kabli od około 10 000 pF do praktycznie dowolnej pojemności. Wartości te dotyczą wykonanego prototypu aparatu.

Układ okienek miernika  $M_1$  został w ten sposób pomyślany aby umożliwić obliczenie iloczynu  $\rho \varepsilon$  wzór (3) z pominięciem pośrednich obliczeń  $R_1$  oraz  $C_1$ . Ponieważ wg wzoru (5)

$$C_1 = \frac{C_2 U_E n}{U_P}$$



natomiast

$$R_1 = \frac{U_p}{I_p}$$

gdzie:  $I_p$  jest prądem przewodnościowym wyznaczonym w ostatniej minucie próby, wobec tego

$$C_1 R_1 = \rho \varepsilon = \frac{C_2 U_z n}{U_p} \frac{U_p}{I_p} = \frac{C_2 U_z n}{I_p}$$

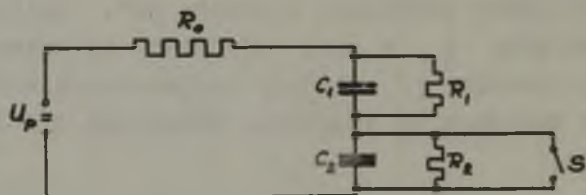
W okienku pierwszym, pokazany jest iloczyn  $C_2 U_z$ , okienko drugie podaje liczbę zadziałań licznika "n". Dzieląc iloczyn  $C_2 U_z n$  przez prąd  $I_p$  w  $\mu A$ , odczytany na aparacie ABK, otrzymuje się iloczyn  $\rho \varepsilon$  - będący proponowanym wskaźnikiem izolacji, nie zależnym od długości, przekroju żył jak i grubości izolacji.

#### Analityczne ujęcie zmian napięcia w rozpatrywanym układzie pomiarowym

Analityczne ujęcie przebiegu napięcia na obiekcie badanym i mierniku ładunku nastrożona szereg trudności i przedstawione być może jedynie w przypadku dokonania pewnych uproszczeń.

Zalecenia dotyczące szybkości podnoszenia napięcia probierczego jak również ograniczona moc aparatu ABK, ograniczają szybkość podnoszenia napięcia na obiekcie badanym. Czynniki te utrudniają lub wręcz uniemożliwiają analityczne ujęcie omawianych przebiegów. Wynika to z niemożliwości analitycznego przedstawienia zmian napięcia probierczego - manipulacji dokonywanej ręcznie, za pomocą pokrętła transformatora regulacyjnego. W toku dalszych obliczeń zostanie dokonane uproszczenie, niewiele odbiegające od stanu rzeczywistego a mianowicie, że napięcie probiercze podnoszone jest skokami. Dla rozpatrywanego przypadku napięcie probiercze będzie podnoszone skokami po 3 kV co 3 sekundy.

Obliczenia zostaną przeprowadzone dla konkretnego układu składającego się z odcinka kabla o napięciu znamionowym 6 kV, pojemności każdej żyły w stosunku do dwóch pozostałych i uzziemionego płaszcza  $C_1 = 2 \mu\text{F}$  i oporności izolacji  $R_1 = 5 \cdot 10^9 \Omega$ . Pojemność kondensatora pomiarowego miernika ładunku  $C_2 = 1 \mu\text{F}$ . Oporność miernika ładunku zmierzona pomiędzy zaciskami wejściowymi a ziemią  $R_2 = 5 \cdot 10^7 \Omega$ . Szeregowy opór dodatkowy  $R_0 = 1 \cdot 10^7 \Omega$  oraz wartość napięcia probierczego  $U_p = 30 \text{ kV}$ , podnoszonego dziesięcioma skokami po 3 kV. Schemat zastępczy rozpatrywanego układu przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Schemat zastępczy układu pomiarowego

$U_p$  - źródło napięcia probierczego,  $R_0$  - opór ochronny,  $C_1 R_1$  - pojemność i oporność obiektu badanego,  $R_2 C_2$  - pojemność i oporność miernika ładunku,  $S$  - stykznik

Rozkład napięcia na pojemności  $C_1$  oraz  $C_2$  w funkcji czasu oblicza się następująco:  
prąd płynący w obwodzie wyraża się zależnością

$$i = u_1 \frac{1}{R_1} + C_1 \frac{du_1}{dt} = u_2 \frac{1}{R_2} + C_2 \frac{du_2}{dt} \quad (6)$$

Zgodnie z drugim prawem Kirchhoffa.

$$U_p = u_1 + u_2 + i R_0 = u_1 + u_2 + R_0 \left( u_1 \frac{1}{R_1} + C_1 \frac{du_1}{dt} \right)$$

skąd

$$u_2 = U_p - u_1 - R_0 \left( C_1 \frac{du_1}{dt} + \frac{u_1}{R_1} \right) \quad (7)$$

Pochodna tego wyrażenia ma postać

$$\frac{du_2}{dt} = - \frac{du_1}{dt} - R_0 C_1 \frac{d^2 u_1}{dt^2} - \frac{R_0}{R_1} \frac{du_1}{dt} \quad (8)$$

Wstawiając do wzoru (8) wartość na  $\frac{du_2}{dt}$  obliczoną z wzoru (6) tj.

$$\frac{du_2}{dt} = \frac{du_1}{dt} \left( \frac{C_1}{C_2} + \frac{R_0 C_1}{R_2 C_2} \right) - \frac{U_p}{C_2 R_2} + \frac{u_1}{C_2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{R_0}{R_1 + R_2} \right)$$

Otrzymuje się równanie różniczkowe drugiego rzędu

$$\frac{d^2 u_1}{dt^2} + \frac{du_1}{dt} \left[ \frac{1}{C_1} \left( \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1} \right) + \frac{1}{C_2} \left( \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_2} \right) \right] + \frac{1}{C_1 C_2} \left( \frac{1}{R_0 R_1} + \frac{1}{R_0 R_2} + \frac{1}{R_1 R_2} \right) u_1 = \frac{U_p}{R_0 R_2 C_1 C_2} \quad (9)$$

Jest to równanie o postaci

$$\frac{d^2 u_1}{dt^2} + a_1 \frac{du_1}{dt} + b_1 u_1 = c_1 \quad (9a)$$

Po podstawieniu wartości liczbowych

$$a_1 = 0,17 \frac{1}{\text{sek}}$$

$$b_1 = 0,001 \frac{1}{\text{sek}^2}$$

$$c_1 = 3 \frac{V}{\text{sek}^2}$$

Równanie charakterystyczne ma postać

$$p^2 + a_1 p + b_1 = 0$$

Pierwiastki tego równania mają postać

$$p_{1,2} = -\frac{a_1}{2} \pm \sqrt{\frac{a_1^2}{4} - b_1}$$

skąd

$$p_1 = -0,0062 \frac{1}{\text{sek}}$$

$$p_2 = -0,164 \frac{1}{\text{sek}}$$

Ogólne rozwiązanie równania ma postać

$$u_1 = A_0 + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} \quad (10)$$

Ponieważ prawa strona równania różniczkowego (9a) jest wielkością stałą zatem

$$A_0 = 2964,4 \text{ V}$$

Z warunków brzegowych dla  $t = 0$   $u_1 = 0$  wyznacza się

$$A_0 + A_1 + A_2 = 0$$

$$A_1 + A_2 = -2964,4$$

Na podstawie wzorów (6) oraz (7) można wyznaczyć wartość prądu

$$i = \frac{U_p - u_1 - u_2}{R_0} = \frac{u_1}{R_1} + C_1 \frac{du_1}{dt} \quad (11)$$

dla  $t=0$   $u_1=0$   $u_2=0$  natomiast  $\frac{du_1}{dt}$  wyznaczone z równania (10) wstawione do wzoru (11) daje wartość prądu w chwili  $t=0$

$$i_0 = \frac{U_D}{R_0} = C_1 p_1 A_1 + C_1 p_2 A_2 \quad (12)$$

zatem

$$A_2 + A_1 \cdot \frac{p_1}{p_2} = \frac{U_D}{p_2 C_1 R_0} = -915,8 \text{ V}$$

$$A_1 = -2129,5 \text{ V}$$

$$A_2 = -834,9 \text{ V}$$

zgodnie z wzorem (10)

$$u_1 = 2964,4 - 2129,5 e^{-0,0062t} - 834,9 e^{-0,164t} \text{ V} \quad (13)$$

Podobną metodą obliczono współczynniki dla napięcia  $u_2$  mającą wartość:

$$a_2 = a_1 = 0,17 \frac{1}{\text{sek}}$$

$$b_2 = b_1 = 0,001 \frac{1}{\text{sek}^2}$$

$$c_2 = 0,03 \text{ V/sek}^2$$

$$B_0 = 29,7 \text{ V}$$

$$B_1 = 1873,1 \text{ V}$$

$$B_2 = -1902,7 \text{ V}$$

$$u_2 = 29,7 + 1873,1 e^{-0,0062t} - 1902,7 e^{-0,164t} \text{ V} \quad (14)$$

Wzory 13 i 14 nie uwzględniają periodycznego rozładowywania pojemności  $C_2$ , zachodzącego po każdorazowym osiągnięciu napięcia zapłonu  $U_z = 400$  V odgromnika Ln.

Z tego względu należy obliczyć czas, po którym napięcie na kondensatorze  $C_2$  osiągnie wartość  $U_2 = U_z = 400$  V, i po którym nastąpi rozładowanie pojemności  $U_2$ , następnie uwzględniając, że styki stycznika rozładowującego kondensator  $C_2$  są zwarte przez czas  $t_z = 0,02$  sek, należy obliczyć przyrost napięcia na doładowywanej w dalszym ciągu pojemności  $C_1$ . Po zakończonym procesie rozładowania pojemności  $C_2$  i rozwarciu jego okładzin następuje dalsze ładowanie pojemności  $C_1$  oraz ponowne ładowanie pojemności  $C_2$ . Po czasie  $t = 3$  sek. od chwili rozpoczęcia pomiaru nastąpi zgodnie ze zrobionym założeniem podskok napięcia o 3 kV.

Czas, po którym napięcie na pojemności  $C_2$  osiągnie 400 V obliczony na podstawie wzoru (14) wynosi  $t_1 = 1,48$  sek. Po czasie tym napięcie na pojemności  $C_1$  osiągnie 200 V. Celem obliczenia przyrostu napięcia na pojemności  $C_1$ , w czasie gdy okładziny kondensatora  $C_2$  są zwarte, należy ułożyć równanie przebiegu napięcia na pojemności  $C_1$  uwzględniając że dla  $t = 1,48 = t_0$   $U_1 = 200$  V.

Równanie to ma postać:

$$U_1 = 2994 - 2794 e^{-0,05t} \text{ V} \quad (15)$$

Z obliczeń wynika, że po czasie  $t_z = 0,02$  sek przyrost napięcia na pojemności  $C_1$  jest pomijalnie mały.

Celem obliczenia przebiegu napięcia na pojemnościach  $C_1$  i  $C_2$  po zakończonym procesie rozładowywania pojemności  $C_2$  tj po czasie  $t_1 + t_2 = 1,50$  sek, należy ułożyć nowe równanie z uwagi na zmianę warunków brzegowych. Dla  $t = 1,50 = t_0$   
 $U_1 = 200$  V  $U_2 = 0$

Równania te przy zachowaniu oznaczeń ze wzorów 13 i 14 mają postać:

$$u_1 = 2964,4 - 1986,1 e^{-0,0062t} - 778,3 e^{-0,164t} \text{ V} \quad (16)$$

$$u_2 = 29,7 + 1743,8 e^{-0,0062t} - 1773,5 e^{-0,164t} \text{ V} \quad (17)$$

Po czasie  $t = 1,50$  sek tj. po upływie 3 sek od rozpoczęcia pomiaru, napięcie na  $C_1$  i  $C_2$  osiągnie wartości

$$u_1 = 390 \text{ V}$$

$$u_2 = 380 \text{ V}$$

Ponowny zapłon odgromnika nastąpi zatem już po podniesieniu napięcia  $U_p$  do 6 kV. Przy napięciu 6 kV napięcie na  $C_1$  będzie zmieniało się wg zależności

$$u_1 = 5928,8 - 4093,6 e^{-0,0062t} - 1445,2 e^{-0,164t} \text{ V} \quad (18)$$

natomiast

$$u_2 = 59,4 + 2933,6 e^{-0,0062t} - 2613 e^{-0,164t} \text{ V} \quad (19)$$

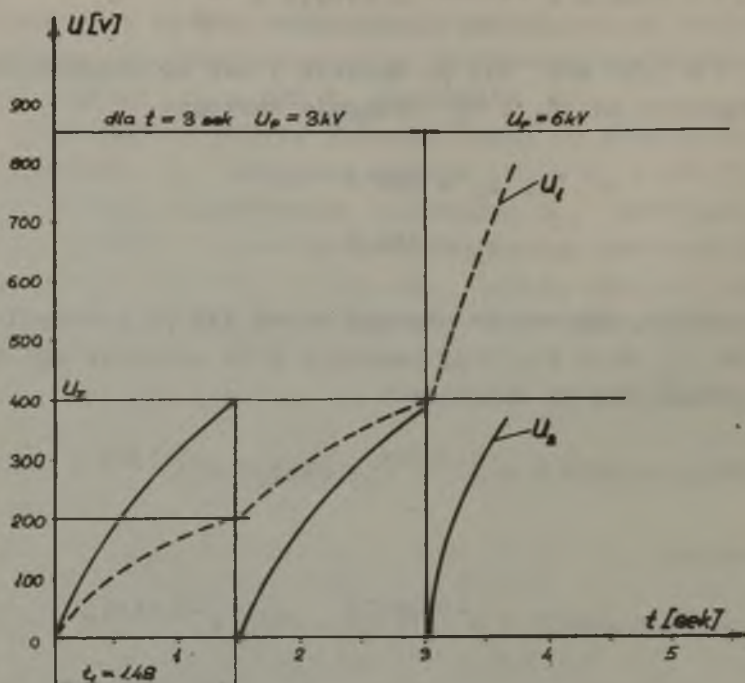
Po czasie około 0,001 sek, nastąpi ponowny zapłon odgromnika, w czasie tym napięcie na  $u_1$  osiągnie wartość 400 V.

Uzyskany za pomocą powyższych wzorów przebieg napięcia na pojemności  $C_1$  i  $C_2$ , dla pierwszych kilku sekund pomiaru, przedstawia rys. 4.

Podobną metodą obliczeń można obliczyć przebieg napięcia dla całego cyklu ładowania tj do czasu gdy napięcie na  $C_1$  osiągnie pełne napięcie probierze.

#### Uwagi końcowe i wnioski

Stosowane obecnie kryteria oceny przydatności eksploatacyjnej kabli, opierające się na dopuszczalnej wartości prądu przewodnościowego na jednostkę długości, wskaźniku asymetrii prądów przewodnościowych oraz niewzrastającej w czasie charakterystyce tego prądu, pozwalają wyeliminować z eksploatacji kable o wyraźnie uszkodzonej izolacji.



Rys. 4. Przebieg napięcia na obiekcie badanym  $U_1$  i mierniku ładunku  $U_2$  w funkcji czasu.  $U_z$  napięcie zapłonu odgromnika

Kryteria te nie dają jednak możliwości dokonania ocen pośrednich stanu izolacji, ocen umożliwiających np. ustalanie postępującego zawilgocenia, czy starzenia się izolacji.

Niedoskonałość stosowanych kryteriów oceny stanu izolacji i związana z tym stosunkowo mała efektywność badań, wzbudza nieufność a nawet niechęć, szczególnie do badań profilaktycznych, badań które mogą odgrywać bardzo istotną rolę w zapewnieniu bezawaryjnej pracy linii kablowych.

Podniesienie skuteczności badań profilaktycznych czy odbiorczych kabli może być osiągnięte na drodze rozszerzenia zakresu badań - wprowadzenia nowych wskaźników, względnie zwiększenia czułości obecnie stosowanych wskaźników.

Bardzo cennym wskaźnikiem stanu izolacji jest tzw. stała czasowa będąca iloczynem RC.



W związku z trudnościami związanymi z wyznaczeniem składników tego iloczynu, wskaźnik ten nie był dotychczas stosowany przy ocenie stanu izolacji kabli elektroenergetycznych.

Przedstawiona w artykule metoda polegająca na pomiarze, za pomocą prostej aparatury, ładunku przepływającego przez badany kabel w czasie próby napięciowej, pozwala wyznaczyć iloczyn RC przy czym obliczenia sprawdzają się do wykonania dwóch działań.

Podstawowymi walorami wskaźnika RC jest niezależność wskaźnika od długości kabla i jego przekroju, daje to możliwość wprowadzenia jednego wskaźnika słusznego np. dla wszystkich kabli rdzeniowych bez względu na ich długość napięcie znamionowe czy przekrój. Drugą ważną zaletą jest zmiana iloczynu RC w szerokim zakresie, w zależności od stanu izolacji, czynnik ten daje możliwość bardziej wnikliwej i selektywnej oceny stanu izolacji.

Pomiary wykonane na kilku obiektach pomiarowych, przy zastosowaniu wykonanego prototypu aparatu oraz aparatu ABK 45 dały wyniki zestawione w tabelicy 1. Pomiary te wykonane zostały przy napięciu 3 Un. W rubryce ostatniej podano wartości  $tg\delta$  zmierzony przy Un. Pomiary zostały wykonane w temperaturze 20°C.

Tabelica 1

Lp.	Obiekt	Un kV	Iloczyn RC	$tg\delta$	Uwagi
1	Kabel	6	134	0,010	tgδ zmierzony przy 6 kV
2	Kondensator	15	312	0,012	
3	Kondensator	2	1700	0,004	
4	Kabel	1	3800	0,003	
5	Kabel	1	7900	0,002	

Wyniki zestawione w tabelicy 1 wykazują dużą ozułość omawianej metody na zmiany stanu izolacji. W przedstawionych skrajnych przypadkach  $tg\delta$  maleje pięciokrotnie natomiast iloczyn RC rośnie prawie siedemdziesięciokrotnie.

Dokładność pomiaru iloczynu  $RC$  zależna jest od dokładności ustalenia pojemności miernika ładunku  $C_2$  oraz napięcia zapłonu  $U_z$  odgromnika. Pewne błędy mogą wynikać w przypadku pomiaru małych pojemności przy niskich wartościach napięć probierczych. Błąd ten może być spowodowany niezarachowaniem przez licznik ładunku zmagazynowanego w pojemności miernika ładunku  $C_2$ , jeżeli napięcie na  $C_2$  nie osiągnie napięcia zapłonu odgromnika, warunkującego przebicie odgromnika i uruchomienie licznika.

W przypadku pomiaru małych pojemności lub kabli o bardzo dobrej izolacji, może zaistnieć konieczność włączenia osułego mikroamperomierza pomiędzy aparatem ABK i miernikiem ładunku. Wynika to ze zbyt małej osułości  $\mu A$  aparatu ABK.

Wadą metody jest zależność wskazań od temperatury, chociaż zależność ta jest mniejsza niż w przypadku pomiaru oporności. Wydaje się, że wprowadzenie tej metody do eksploatacji, po uprzednim opracowaniu na podstawie dużej ilości pomiarów, kryteriów oceny przydatności eksploatacyjnej kabli na podstawie wskaźnika  $RC$ , mogłoby znacznie podnieść efektywność badań odbiorczych i profilaktycznych kabli elektroenergetycznych.

Rękopis złożono w redakcji w styczniu 1968 r.

#### LITERATURA

- [1] Instrukcja badań odbiorczych urządzeń elektrycznych. Zjednoczenie Energetyki 1964.
- [2] Instrukcja eksploatacji elektroenergetycznych linii kablowych. Zjednoczenie Energetyki 1966.
- [3] Papużyński W.: Wpływ zjawisk jonizacyjnych w izolacji papierowo-olejowej kabli na dobór napięć probierczych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej ELEKTRYKA z. 21, 1966.
- [4] GREJSUCH M.A. i inni: Bumažno-maslannaja izolacija w wysokowoltnych konstrukcijach. Gosenergoizdat 1963.
- [5] TICHY V.: Die Ausnutzung der Nachwirkvorgänge in Isolierstoffen zur Bestimmung ihres Feuchtigkeitsgehaltes. Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule Ilmenau Heft 5. 1963.

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ НА ОСНОВАНИИ  
ВЫЧИСЛЕНИЯ ПРОИЗВЕДЕНИЯ

Р е з ю м е

В статье представлен метод и достаточно несложная аппаратура, служащая для оценки состояния изоляции кабелей на основании одновременного измерения электрической емкости и сопротивления изоляции. Измерение проводится во время испытания напряжением показателем состояния изоляции является произведение измеренных величин.

Предлагаемый метод дает показатель оценки состояния изоляции независимо от длины кабеля.

ESTIMATE OF CABLE INSULATION STATE ON  
THE BASE OF RC PRODUCT MEASUREMENT

S u m m a r y

In this report was shown the method and simple enough apparatus, which are used for estimate of cable insulation state, under on the ground of simultaneous measurement of insulation capacity and it resistance. The measurement is achived during the voltage test, and the product of measured RC quantities is of the insulation state indioator.

The proposed method gives the estimate indioator of insulation state independent of oable length.