

WITOLD PAPUŻYŃSKI  
Katedra Wysokich Napięć

ZASTOSOWANIE ANALIZY TLUMIONYCH WYŁADOWAŃ OSCYLACYJNYCH  
DO WYZNACZANIA STRATNOŚCI DIELEKTRYCZNEJ  
KONDENSATORÓW IMPULSOWYCH

Streszczenie. Przedstawiona w artykule metoda, pozwala wyznaczyć  $\operatorname{tg} \delta$  dowolnej pojemności, na podstawie parametrów obwodu oscylacyjnego, w skład którego wchodzi badana pojemność oraz oscylogramu przebiegu wyładowania.

Metoda ta w połączeniu z metodą graficzno-analityczną, opracowana przez autora, daje możliwość wyznaczenia strat wydzielających się w kondensatorze impulsowym.

### 1. Wprowadzenie

Wynikająca niekiedy konieczność wyznaczenia  $\operatorname{tg} \delta$  dużych pojemności, szczególnie przy podwyższonych częstotliwościach i wysokich napięciach, nastrocza szereg znanych i poważnych trudności, takich np. jak konieczność angażowania do tych pomiarów źródeł napięcia o bardzo wielkich mocach.

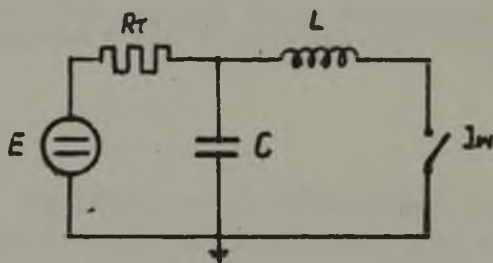
Przykładem konieczności znajomości  $\operatorname{tg} \delta$  jest przedstawiona w (1) i (2) metoda obliczania strat w kondensatorach impulsowych, polegająca na rozłożeniu przebiegu oscylacyjnego w szereg Fouriera, a następnie obliczeniu i zsumowaniu strat dla każdej harmonicznej, metoda ta wymaga znajomości  $\operatorname{tg} \delta$  odpowiadającego częstotliwości każdej harmonicznej.

Oparcie toku obliczeń dla różnych kondensatorów np. papierowo-olejowych na jednym wykresie  $\operatorname{tg} \delta = f(\omega)$  (zależności te można znaleźć w (3)), obarcza obliczenia nie dającym się bliżej określić błędem wynikającym z możliwości nawet znacznych rozrzutów wartości  $\operatorname{tg} \delta$  dla różnych kondensatorów o tej samej izolacji, ale różnych jej stanach np. zawilgocenie, posunięte procesy starzenia itp.

Opisana poniżej metoda, pozwala wyznaczyć  $tg\delta$  praktycznie dowolnie wielkiej pojemności, wykorzystując w tym celu analizę tłumionych oscylacji obwodu, zasilanego napięciem stałym, którego jednym z elementów jest badana pojemność.

## 2. Wyznaczanie $tg\delta$ kondensatorów na podstawie analizy tłumionego przebiegu oscylacyjnego

Zasadę metody najdogodniej przedstawić na przykładzie uproszczonego obwodu oscylacyjnego rys. 1, składającego się z pojemności  $C$ , indukcyjności  $L$  oraz układu włączającego  $I_w$ , nie wprowadzającego do obwodu dodatkowych oporności i indukcyjności (4).



Rys. 1

$E$  - Źródło napięcia stałego,  $R_T$  - Opór ładujący,  $C$  - Kondensator impulsowy,  $L$  - Indukcyjność,  $I_w$  - Iskiernik włączający.

Oscylogram przebiegu napięcia, zdjęty dla obwodu rys. 1 wykaże tłumienie oscylacji. Tłumienie to w przypadku założenia idealnej indukcyjności  $L$  o oporności  $R = 0$ , spowodowane będzie stratami energii w kondensatorze. Tłumienie występujące w obwodzie można wyrazić logarytmicznym dekrementem tłumienia

$$\delta = b \cdot T$$

gdzie:

$$b = \frac{R}{2L}$$

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - b^2}} \quad (1)$$

Po uwzględnieniu że  $\sqrt{\omega_0^2 - b^2} = \omega$  jest pulsacją rzeczywistych drgań obwodu, wzór (1) można wyrazić

$$\delta = \frac{R}{\omega L}$$

skąd

(2)

$$R = \frac{\delta L \omega}{\pi}$$

gdzie: R obrazuje straty wydzielające się w obwodzie.

W przypadku rzeczywistej indukcyjności, R obrazuje straty wydzielające się w kondensatorze i indukcyjności a zatem

$$R = R_K + R_L \quad (3)$$

gdzie indeks K - odnosi się do kondensatora a L do indukcyjności.

Dla kondensatora przedstawionego za pomocą szeregowego układu zastępczego, układ ten odpowiada bardziej charakterowi pracy omawianych kondensatorów impulsowych,  $\operatorname{tg} \delta$  wyraża się zależnością

$$\operatorname{tg} \delta = R \omega C = R \frac{1}{\omega L} \quad (4)$$

gdzie:  $R = R_K$

Na podstawie wzorów (2, 3, 4), wzór na  $\operatorname{tg} \delta$  kondensatora można wyrazić zależnością

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\delta}{\pi} - \frac{R_L}{\omega L} \quad (5)$$

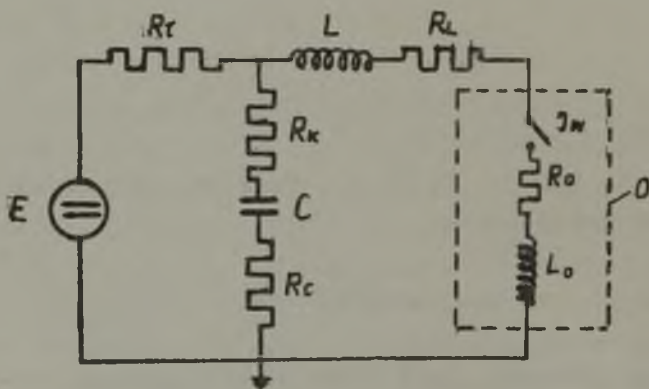
uwzględniając, że  $\frac{R_L}{\omega L}$  jest odwrotnością dobroci indukcyjności L, wzór na  $\operatorname{tg} \delta$  przyjmie ostateczną postać

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\delta}{\pi} - \frac{1}{Q} \quad (6)$$

Na podstawie wzoru (6) można wyznaczyć  $tg\delta$  badanego kondensatora obliczając z oscylogramu, logarytmiczny dekrement tłumienia oraz mierząc za pomocą  $Q$  - metru dobroć indukcyjności  $L$ . Dobroć  $Q$  można również wyznaczyć analitycznie z dokładnością rzędu jednego procentu (5).

### 3. Wyznaczanie $tg\delta$ kondensatorów impulsowych

Bezpośrednie zastosowanie opisanej metody, do wyznaczania  $tg\delta$  kondensatorów impulsowych, nastęrcza szereg trudności związanych z koniecznością uwzględnienia pomijanych dotychczas czynników wpływających również na tłumienie obwodu. W przypadku kondensatorów impulsowych, których praca charakteryzuje się przepływem bardzo znacznych prądów, poza stratami w dielektryku, należy uwzględnić również straty w okładzinach kondensatora i połączeniach. Uwzględnienie wpływu tych czynników jest stosunkowo łatwe, gdyż oporność okładzin kondensatora może być obliczana (3), a oporność połączeń przy odpowiedniej ich konstrukcji może być sprawdzona praktycznie do zera. Natomiast znacznie poważniejsze trudności wynikają przy ustaleniu parametrów odbiornika, oscylacyjnego obwodu roboczego rys. 2.



Rys. 2

$E$  - Źródło napięcia stałego,  $R_L$  - Opór ładujący,  $C$  - Kondensator impulsowy,  $R_k$  - Opór obrazujący straty w kondensatorze,  $R_c$  - Opór obrazujący oporność okładzin kondensatora,  $L$  - Indukcyjność obwodu,  $R_L$  - Opór obrazujący straty w cewce,  $S_w$  - Iskiernik włączający,  $O$  - Odbiornik,  $R_0$  - Oporność odbiornika,  $L_0$  - Indukcyjność odbiornika

Odbiornikiem energii obwodu oscylacyjnego może być np. uzwojenie pierwotne transformatora spawalniczego, dającego obciążenie indukcyjne, czy układ elektrohydrauliczny, do drobienia np. ziarn karborundu, dający obciążenie omowe, czy wreszcie układy o obciążeniu mieszanym.

Wyznaczenie dobroci czy oporności takich obwodów jest oczywiście trudne, gdyż parametry te należało by wyznaczyć w warunkach obciążenia znamionowego. Znacznie dogodniejszym sposobem wyznaczenia tg $\delta$  badanego kondensatora jest wykorzystanie w tym celu pomocniczego obwodu oscylacyjnego.

Po zdjęciu oscylogramu przebiegu napięcia w badanym obwodzie impulsowym rys. 2, należy wyznaczyć częstotliwość drgań obwodu, następnie logarytmiczny dekrement tłumienia. Na podstawie tych dwóch wielkości oraz znanej pojemności kondensatora  $C$  można obliczyć indukcyjność obwodu

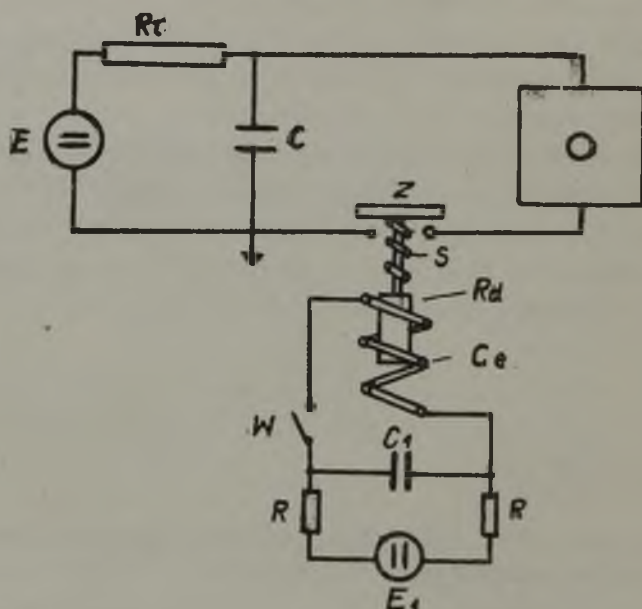
$$L = \frac{1}{f^2 C (4\pi^2 + \delta^2)} \quad (7)$$

oraz oporność obwodu  $R = 2 L \delta f$  (8)

Po wyznaczeniu tych wielkości, należy zmontować pomocniczy obwód oscylacyjny składający się z badanej pojemności  $C$ , specjalnie dobranej cewki indukcyjnej  $L$  obliczonej wg wzoru (7). Dobroć cewki najdogodniej wyznaczyć metodą analityczną (5). Dalszymi elementami pomocniczego obwodu oscylacyjnego są: bezindukcyjna oporność  $R$  wg wzoru (8), oraz element bardzo ważny mianowicie iskiernik włączający.

Konstrukcja iskiernika włączającego musi zapewniać nie tylko pomijalnie małą indukcyjność i oporność, ale nie może on dawać również przedwczesnych zapłonów, co wprowadzałoby do obwodu nieliniową oporność łuku. Istnieje wiele możliwości rozwiązań iskiernika włączającego odpowiadającego postawionym wymaganiom. Jednym z rozwiązań dość prostych jest stycznik z napędem impulsowym, o silnie utlenionych elektrodach miedzianych. Warstwa tlenku zapobiega całkowicie zapłonowi w czasie zbliżania kontaktów stycznika przy napięciach do około 20 kV. Rys.3.

Po zmontowaniu obwodu z wyżej wymienionych elementów, należy zdjąć oscylogram przebiegów oscylacyjnych i porównać go z oscylogramem przebiegów obwodu przedstawionego na rys. 2 aby stwierdzić czy częstotliwość obydwu obwodów są jednakowe. Tłumienie obydwu obwodów nie musi być identyczne.



Rys. 3

$E$  - Źródło napięcia stałego,  $R_c$  - Opór ładujący,  $C$  - Kondensator impulsowy,  $O$  - Odbiornik,  $Z$  - Zwieracz stycznika,  $S$  - Sprężyna,  $R_d$  - Rdzeń stycznika,  $C_e$  - Cewka stycznika,  $W$  - wyłącznik,  $C_1$  - Kondensator obwodu stycznika,  $R$  - Opory ładujące,  $E_1$  - Źródło napięcia stycznika

Oscylogram przebiegu napięcia obwodu pomocniczego może być wykorzystany do wyznaczania  $\operatorname{tg} \delta$  badanego kondensatora. Należy w tym celu wykorzystać wzór (6) uzupełniony elementem  $R_c$  uwzględniającym oporność okładzin kondensatora.

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\delta}{\pi} - R_c \omega C - \frac{1}{Q} \quad (7)$$

#### 4. Porównywalność wyników uzyskanych opisaną metodą i mostkiem Scheringa

Zagadnieniem wymagającym omówienia jest sprawa porównywalności wyników tj. wartości  $tg\delta$ , otrzymanych metodą analizy tłumionych przebiegów i za pomocą mostka Scheringa.

Porównanie to może być przeprowadzone jedynie dla pojemności dla których, z uwagi na wielkość napięcia, częstotliwości i pojemności, możliwe jest wyznaczenie  $tg\delta$  metodą mostkową. Należy stwierdzić, że wyniki te mogą w pewnych przypadkach nawet znacznie się różnić.

Różnice te wynikają stąd, że  $tg\delta$  jest funkcją nie tylko napięcia ale również funkcją czasu.

Czas stabilizacji  $tg\delta$  tj. czas po którym  $tg\delta$  staje się niezmienny w czasie, przy tym samym napięciu, jest zależny od rodzaju dielektryka, jego budowy, zanieczyszczeń, a także wysokości przyłożonego napięcia.

Np. w przypadku dielektryków o dużej upływności i złych warunkach chłodzenia,  $tg\delta$  nie ustala się a rośnie co doprowadza z czasem do przebiccia.

Jak wiadomo istnieją wzory empiryczne pozwalające ustalić tz napięcie graniczne, jako funkcję stratności jednostkowej i warunków chłodzenia.

W przypadku dielektryków z wtrącinami gazowymi, po przekroczeniu napięcia jonizacji, ale poniżej napięcia jonizacji krytycznej, która powoduje szybkie niszczenie dielektryka, rozpoczynają się wyładowania jonizacyjne, czas rozwoju tych wyładowań jest rzędu dziesiątych a nawet setnych części  $\mu s$  (6). Dla przebiegów takich czas stabilizacji  $tg\delta$  jest praktycznie natychmiastowy.

Metoda analizy tłumienia przebiegów pozwala wyznaczyć jedynie chwilowe wartości  $tg\delta$ , a więc dla dielektryków o krótkim czasie stabilizacji  $tg\delta$ , rzędu  $\mu s$ , wartości mierzone mostkiem Scheringa i opisaną metodą będą praktycznie identyczne. Natomiast w przypadku dielektryków o długim czasie stabilizacji  $tg\delta$  wartości te będą się różniły.

Należy obecnie ocenić przydatność wyników, uzyskanych opisaną metodą, do wyznaczania  $tg\delta$  kondensatorów impulsowych i ewentualnego wykorzystania tych wartości do wyznaczania strat w kondensatorach impulsowych.

W przypadku dielektryków o krótkim czasie stabilizacji  $tg\delta$ , przydatność metody nie powinna nasuwać zastrzeżeń. Natomiast przy długim czasie stabilizacji  $tg\delta$  przydatność metody uwarunkowana jest częstością cykli roboczych.

Jeżeli przerwy pomiędzy kolejnymi cyklami roboczymi są tak długie, że ilość ciepła wydzielająca się w kondensatorze, w czasie jednego cyklu roboczego zostanie odprowadzona na zewnątrz, to wartości  $tg\delta$  i straty obliczone przy pomocy tych wartości będą bardziej zbliżone do rzeczywistych, zmierzonych np. metodą kalorymetryczną, niż wartości obliczone przy wykorzystaniu  $tg\delta$  wyznaczonego za pomocą mostka Scheringa. Te ostatnie będą zawyżone. W przypadku dużej częstości cykli roboczych straty obliczone za pomocą  $tg\delta$  wyznaczonego przy zastosowaniu opisaney metody będą zaniżone.

## 5. Wnioski

Przedstawiona w artykule metoda wyznaczania  $tg\delta$  kondensatorów, na podstawie analizy oscylogramu tłumionego przebiegu oscylacyjnego jest w przypadku kondensatorów impulsowych metodą dość skomplikowaną i wymagającą przeprowadzenia szeregu trudnych pomiarów pomocniczych.

Wyniki uzyskane za pomocą opisaney metody, mogą się np. w przypadku dielektryków o dużej upływności, nawet znacznie różnić od wyników uzyskanych metodą mostka Scheringa.

Wspomniane mankamenty nie zmniejszają jednak przydatności metody, gdyż jak wiadomo, wyznaczanie  $tg\delta$  przy wysokich napięciach i podwyższonych częstotliwościach, jest dość łatwe jedynie w przypadku małych pojemności, natomiast w przypadku dużych pojemności up. baterii kondensatorów, nastrocza bardzo poważne trudności.

Dlatego też wprowadzenie tej metody, pozwalającej wyznaczyć  $tg\delta$  całego obiektu a nie tylko modelu, przy określonej często-



tlivości i napięciu, może mieć wpływ na dokładniejsze określenie  $tg\delta$  a pośrednio wpłynie na ściślejsze określenie strat wydzielających się w kondensatorach impulsowych.

Rękopis złożono w redakcji we wrześniu 1966 r.

#### LITERATURA

- [1] Papużyński W.: Metoda analityczno-graficznego wyznaczania strat w kondensatorach impulsowych. Zesz.Nauk.Pol.Śl. Elektryka 22/67.
- [2] Papużyński W.: Obliczanie strat oraz modelowe badania zjawisk jonizacyjnych w kondensatorach impulsowych. Rozprawa doktorska 1964.
- [3] Renne W.T.: Elektrieskije kondensatory. Gosenergoizdat 1959.
- [4] Freise W.: Zur Messung des Verlustwinkels von grossen einseitig geerdeten. Kapazitäten EZT-A Bd 80 H. 10 1959.
- [5] Smirenin B.A.: Sprawocznik po radiotekhnike. Gosenergoizdat 1950.
- [6] Greisuch M.A. i inni: Bumažno-maslianaja izolacija. Gosenergoizdat 1963.

#### ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИЗА ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ РАЗРЯДОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ В ИМПУЛЬСНЫХ КОНДЕНСАТОРАХ

#### Резюме

Представленный в статье метод дает возможность определить  $tg\delta$  произвольной емкости на основании параметров колебательного контура, в состав которого входит исследуемая емкость и осциллограммы разрядного процесса. Этот метод в соединении с разработанным автором графически-аналитическим методом дает возможность определить потери, выделяющиеся в импульсном конденсаторе.

APPLYING OF THE ANALYSIS OF THE DAMPED OSCILLATION DISCHARGES  
FOR THE DETERMINATION OF THE DIELECTRIC LOSS OF THE IMPULSE  
CONDENSERS.

S u m m a r y

Described in the paper method allows to determinate the  $\operatorname{tg}\delta$  of the optional capacity, based on the parameters of the oscillation circuit included the investigated capacity and on the oscillogram of the discharge transient. This method with the graphical and analytical method, elaborated by the author enables the determination of the losses, emitting in the impulse condensers.