ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1976

Seria: Elektryka z.53 Nr kol. 489

Teresa SZADKOWSKA

Instytut Metrologii Elektrycznej i Elektronicznej
Politechniki Śląskiej

FUNKCJA OPISUJĄCA ABSORPCYJNE WŁASNOŚCI DIELEKTRYKÓW STAŁYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono podstawowe równanie rozważanej funkcji f(t) i jej powiązania z innymi parametrami dielektryku. Wskazano na możliwości wykorzystania funkcji f(t) w eksperymentalnej ocenie własności i stanu materiałów elektroizolacyjnych.

Zjawiska wolnozmiennych polaryzacji są przyczyną znanego efektu absorpcji, który pojawia się w większości dielektryków, szczególnie uwarstwionych, poddanych działaniu stałego pola elektrycznego. Informacje zawarte w odpowiedzi badanego dielektryku umieszczonego w polu elektrycznym są z jednej strony wykorzystywane w badaniach materiałów izolacyjnych, a z drugiej umożliwiają poznanie mechanizmów i zjawisk związanych z absorpcją. Zależnie od tego jakie czynności poprzedzają dokonywane obserwacje oraz jaka wielkość jest mierzona odpowiedzią dielektryku - jest:

- przepływ prądu ładowania;
- przepływ prądu rozładowania;
- występowanie napięcia samoistnego;
- występowanie napięcia powrotnego.

Funkcja f(t)*), której analityczny zapis w ogólnej postaci podaje równanie:

$$f(t) = (C_s - C_\infty)\,\frac{d\,F(t)}{dt}, \tag{1}$$

gdzie:

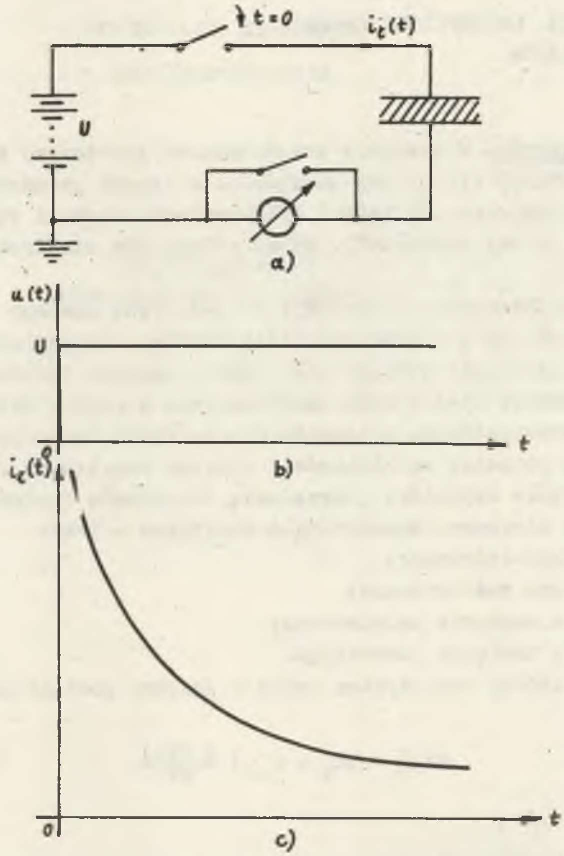
f(t) - funkcja charakteryzująca absorpcję spowodowaną zjawiskami wolnozmiennych polaryzacji;

F(t) - funkcja opisująca czasową zmienność polaryzacji zwłocznych przy wymuszeniu o charakterze funkcji skokowej;

*) Funkcja f(t) określona równaniem (1) jest odpowiednikiem funkcji znanej w literaturze [1], [2], [3], [8], [4], [9], [7] pod różnymi nazwami np. prądowa funkcja spadania, prądowa funkcja relaksacji, funkcja przepustowości, funkcja przejścia lub funkcja szybkości relaksacji.

C_s, C_∞ - pojemność badanego dielektryku odpowiednio dla $t = \infty$ oraz $t = 0$

jest wielkością wiążącą odpowiedzi prądowe i napięciowe dielektryku i umożliwia wprowadzenie jednolitej postaci równań, opisujących zachowanie się absorpcyjnych dielektryków poddanych działaniu dowolnie zmiennego pola elektrycznego, przy założeniu, że działające na dielektryk pole elektryczne nie przekroczy granic liniowego zachowania się dielektryku.



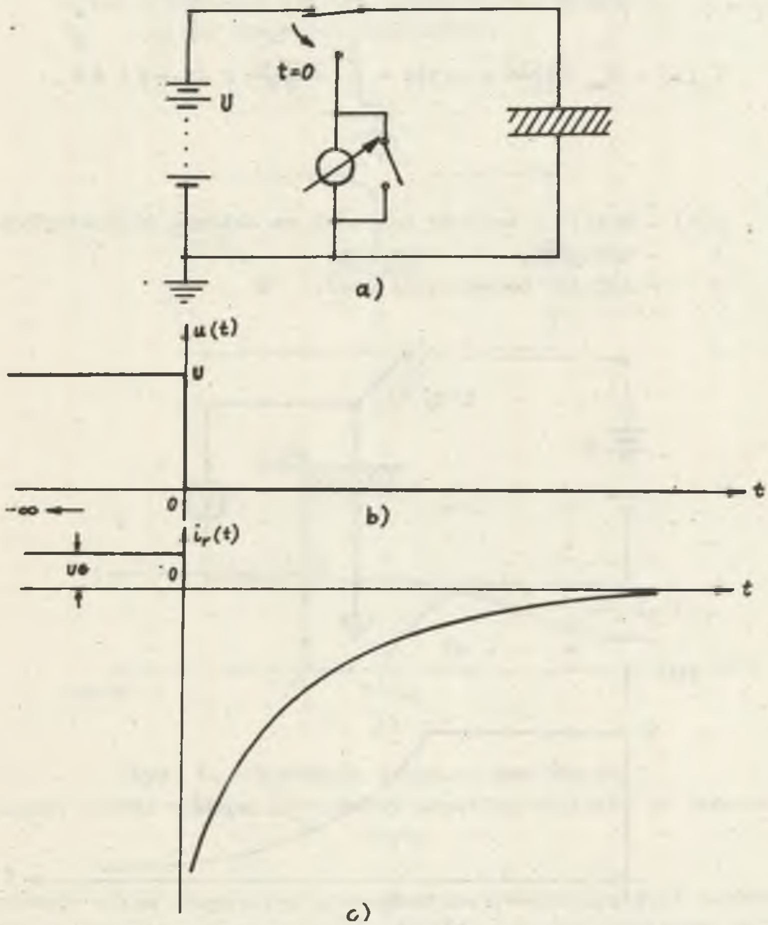
Rys. 1. Ładowanie dielektryku napięciem stałym: a) obwód ładowania, b) czasowy przebieg napięcia ładowania, c) czasowy przebieg prądu ładowania

Jeśli rozpatrzyć odpowiedź prądową dielektryku (o zerowych warunkach początkowych) ładowanego napięciem stałym, przyłożonym skokowo w chwili $t = 0$ (rys. 1a,b), to równanie prądu ładowania określone jest zależnością (2) zilustrowaną wykresem na rys. 1c; [8],[9].

$$i_ł(t) = C_\infty\, U\,\delta(t) + UG + U\,f(t), \qquad (2)$$

gdzie:

- $i_ł(t)$ – chwilowa wartość prądu ładowania;
- U – napięcie ładowania;
- C_∞ – pojemność geometryczna badanego dielektryku;
- G – upływność dielektryku;
- $\delta(t)$ – impulsowa funkcja Diraca.



Rys. 2. Rozładowanie dielektryku ładowanego nieskończenie długo napięciem stałym:
a) obwód rozładowania, b) czasowy przebieg napięcia na badanym dielektrylektryku, c) czasowy przebieg prądu rozładowania

Jeśli po nieskończenie długim ładowaniu obserwować prąd rozładowania dielektryku (rys. 2), to równanie tego prądu ma postać określoną zależnością (3); [8], [9].

$$i_r(t) = - C_\infty \; U\delta(t) - U\, f(t), \tag{3}$$

gdzie:

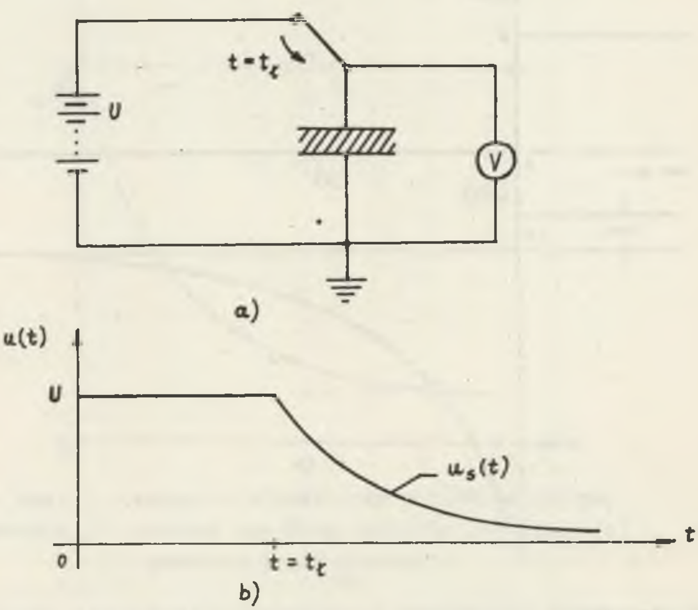
$i_r(t)$ - chwilowa wartość prądu rozładowania.

Odpowiedź prądowa dielektryku w przypadku, gdy napięcie ładowania jest dowolną funkcją czasu, ma postać opisaną równaniem [8], [9]:

$$i_z(t) = C_\infty \frac{du(t)}{dt} + u(t)G + \int_{-\infty}^{t} \frac{d\,u(\nu)}{d\nu}\, f\,(t-\nu)\, d\nu, \tag{4}$$

gdzie:

$u(t)$ - chwilowa wartość napięcia na badanym dielektryku;
t - parametr;
ν - zmienna oznaczająca czas.



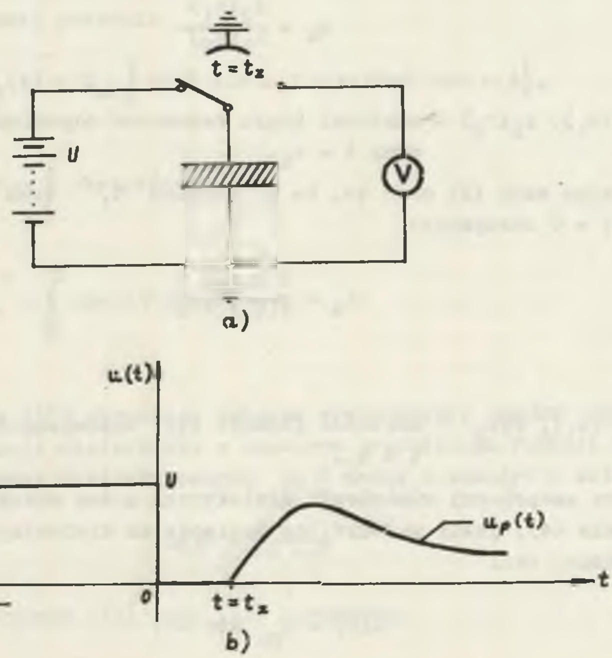
Rys. 3. Obserwacja napięcia samoistnego
a) schemat ideowy układu, b) czasowy przebieg napięcia na badanym dielektryku

Jeśli obserwować odpowiedzi napięciowe dielektryku, to w przypadku obserwacji napięcia samoistnego (rys. 3) czasowy przebieg tego napięcia występującego w chwilach $t \geqslant t_{ł+}$ opisuje równanie [5], [9]:

$$C_{\infty} \frac{d\, u_s(t)}{dt} + u_s(t)G + U\, f(t_ł + t) + \int_{t_ł}^{t} \frac{d\, u_s(\vartheta)}{d\,\vartheta} f(t - \vartheta)\, d\vartheta = 0, \qquad (5)$$

gdzie:

$u_s(t)$ – chwilowa wartość napięcia samoistnego;
$t_ł$ – czas ładowania dielektryku.



Rys. 4. Obserwacja napięcia powrotnego
a) schemat ideowy układu, b) czasowy przebieg napięcia na badanym dielektryku

Podobnie można rozpatrzyć przypadek obserwacji napięcia powrotnego (rys. 4). Czasowy przebieg tego napięcia, występującego w chwilach $t \geqslant t_{z+}$, opisać można równaniem [5], [9]:

$$C_{\infty} \frac{d\, u_p(t)}{dt} - U\, f(t_z + t) + \int_{t_z}^{t} \frac{d\, u_p(\vartheta)}{d\,\vartheta} f(t - \vartheta)\, d\vartheta = 0; \qquad (6)$$

gdzie: $u_p(t)$ - chwilowa wartość napięcia powrotnego;
t_z - czas zwarcia dielektryku.

Jak wynika z równań (2), (3), (5) oraz (6) funkcja f(t) wpływa na czasowe przebiegi odpowiedzi prądowych lub napięciowych dielektryku. A zatem obserwacja tych odpowiedzi umożliwia wyznaczenie czasowego przebiegu funkcji f(t).

Znajomość przebiegu funkcji f(t) pozwala wyznaczyć inne wielkości stosowane w ocenie własności i stanu materiałów elektroizolacyjnych. Należą do nich współczynnik absorpcji k_A, składowe zespolonej admitancji dielektryku, współczynnik strat dielektrycznych [2], [6], [8] *)

Współczynnik absorpcji k_A jest określany jako:

$$k_A = \frac{i_ł(t_1)}{i_ł(t_2)} \tag{7}$$

gdzie: $i_ł(t_1)$, $i_ł(t_2)$ - wartości prądu ładowania odpowiednio dla $t = t_1$ oraz $t = t_2$.

Uwzględniając wzór (2) oraz to, że w chwilach t_1 oraz t_2 człon $C_\infty U\delta(t) = 0$ otrzymamy:

$$k_A = \frac{f(t_1) + G}{f(t_2) + G}, \tag{7a}$$

gdzie:

$f(t_1)$, $f(t_2)$ - wartości funkcji f(t) odpowiednio dla $t = t_1$ oraz $t = t_2$.

Składowe zespolonej admintacji dielektryku można wyznaczyć wykorzystując równanie (4), jeśli założyć, że napięcie na dielektryku zmienia się sinusoidalnie, tzn.

$$u(t) = U_{mx} \sin \omega t \tag{8}$$

*) Możliwość wyznaczenia składowych zespolonej admitancji dielektryku oraz współczynnika strat dielektrycznych, tzn. wielkości charakterystycznych dla badań zmiennoprądowych na podstawie informącji zawartych w przebiegu funkcji f(t), wyznaczonym metodą stałoprądową, oznacza przejście z dziedziny czasu w dziedzinę częstotliwości. Ma to szczególne znaczenie w przypadku badania własności dielektryków w zakresie częstotliwości podakustycznych, tzn. w paśmie częstotliwości nie objętym zakresami aparatury zmiennoprądowej.

Uwzględniając we wzorze (1) zależność (8) po przekształceniach otrzymamy:

$$i_ł(t) = C_\infty \omega U_{mx} \cos\omega t + G\, U_{mx} \sin\omega t +$$

$$+ \omega U_{mx} \cos\omega t \int_0^\infty \cos\omega\vartheta\, f(\vartheta)\, d\vartheta +$$

$$+ \omega U_{mx} \sin\omega t \int_0^\infty \sin\omega\vartheta\, f(\vartheta)\, d\vartheta \tag{9}$$

lub zapisując w innej postaci:

$$i_ł(t) = U_{mx}\left[G(\omega)\sin\omega t + \omega C(\omega)\cos\omega t\right], \tag{10}$$

gdzie:

$$G(\omega) = G + \omega \int_0^\infty \sin\omega\vartheta f(\vartheta)\, d\vartheta \tag{11}$$

$$C(\omega) = C_\infty + \int_0^\infty \cos\omega\vartheta\, f(\vartheta)\, d\vartheta \tag{12}$$

Równania (11) oraz (12) określają związek występujący między składowymi zespolonej admitnacji dielektryku a czasowym przebiegiem funkcji f(t).

Współczynnik strat dielektrycznych $tg\,\delta$ można wyznaczyć z zależności:

$$tg\,\delta = \frac{G(\omega)}{\omega C(\omega)} \tag{13}$$

Po uwzględnieniu wzorów (11) oraz (12) otrzymamy:

$$tg\,\delta = \frac{G + \omega \int_0^\infty \sin\omega\vartheta f(\vartheta)\, d\vartheta}{\omega\left(C_\infty + \int_0^\infty \cos\omega\vartheta f(\vartheta)\, d\vartheta\right)} \tag{14}$$

Na podstawie przeprowadzonych rozważań funkcję f(t) można uważać jako podstawową wielkość charakteryzującą absorpcję. Eksperymentalne wyznaczenie przebiegu tej funkcji umożliwia wykorzystanie zawartych w niej informacji w ocenie stanu i własności materiałów elektroizolacyjnych.

LITERATURA

[1] Artbauer J., Sedovic J., Ademec V: Izolanty a izolacie.Nakladatelstwo Alfa, Bratislava 1969.

[2] Baird M.E.: Determination of dielectric behavior at low frequencies from measurements of anomalous charging and discharging currents,Rev. of Mod.Phys., Vol. 40, Nr 1, 1968.

[3] Daniels V.V.: Dielectric relaxation, Academic Press, London and New York 1967.

[4] Gąszczak J.: Zagadnienie wpływu zjawiska absorpcji dielektrycznej na wyniki pomiarów pojemności kondensatorów. Praca doktorska,Wrocław 1964.

[5] Gross E.: On discharge voltage and return voltage curves for absorptive capacitors, Phys. Rev.,Vol. 62, Nr 1, 1942.

[6] Hamon B.V.: An approximate method for deducing dielectric loss factor from dc measurements, PIEE, pt. II, Vol. 99, 1952.

[7] Maison A.: Powolna polaryzacja i przewodnictwo elektronowe dielektryków stałych. Prace Instytutu Elektrotechniki, z.91, Warszawa 1975.

[8] Nemeth E.: Proposed fundamental characteristic describing dielectric processes in dielectrics, Periodica Polytechnica Electrical Engineering, Vol.15, Nr 4, 1971.

[9] Szadkowska T.: Analiza metod pomiaru funkcji charakteryzującej wolnozmienne polaryzacje dielektryków stałych. Rozprawa doktorska, Gliwice 1975.

ФУНКЦИЯ ИЗОБРАЖАЮЩАЯ АБСОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА
ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Р е з ю м е:

Представлено основное уравнение обсуждаемой функции f(t) и связание её с другими параметрами диэлектрика. Указаны возможности использования функции f(t) в экспериментальной оценке свойств и состояния электроизоляционных материалов.

FUNCTION DESCRIBING ABSORBING PROPERTIES OF SOLID DIELECTRICS

S u m m a r y

In the article the basic equation of the considered function f(t) and its relations to other parameters of dielectrics are presented. Possibilities of the application of function f(t) in the experimental estimation of properties and condition of electroinsulating material are pointed out.