

Teresa Szadkowska
Mieczysław Pluciński

Instytut Metrologii i Maszyn Elektrycznych
Politechniki Śląskiej

WPLYW REZYSTANCJI OBWODU ŁADOWANIA NA POMIAR PRĄDU ABSORBCJI

Streszczenie. W artykule przeprowadzono analizę wpływu rezystancji obwodu ładowania oraz sformułowano warunki poprawności pomiaru prądu absorpcji z uwzględnieniem tego wpływu.

Pomiary prądu ładowania stanowią najstarszy rodzaj badań dielektryków stałych [8], [11]. W ostatnich latach obserwuje się zwiększone zainteresowanie możliwościami wykorzystania tych badań w profilaktyce izolacji [7], [9], jak również w ocenie własności nowych materiałów elektroizolacyjnych [1], [2], [3], [4], [5], [6].

Jeśli w układzie przedstawionym na rys. 1, w chwili $t = 0$ zostanie przyłożone na elektrycznie obojętny dielektryk skokowo stałe napięcie U , to miernik wskaże prąd malejący w czasie do wartości ustalonej, określonej przewodnością badanego dielektryku.

Płynący w obwodzie prąd ładowania $I_{\Sigma}(t)$ można traktować jako sumę trzech prądów składowych (rys. 1c), tzn.

$$I_{\Sigma}(t) = I_0(t) + I_A(t) + I_G \quad (1)$$

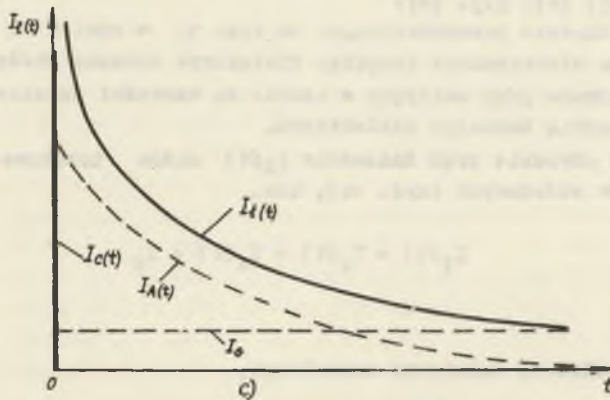
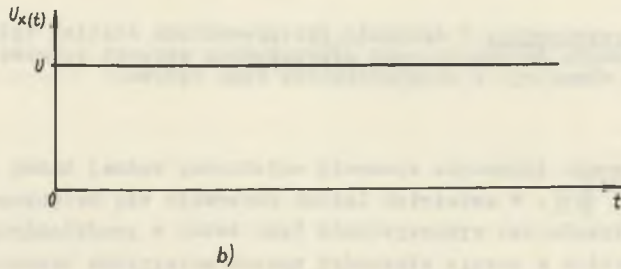
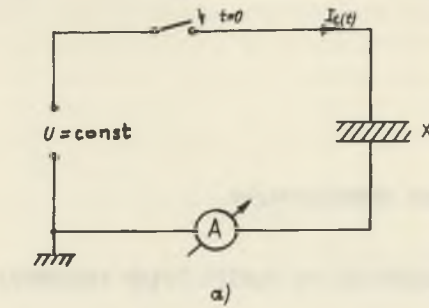
gdzie:

$I_0(t)$ - składowa ładowania normalnego,

$I_A(t)$ - składowa absorpcyjna,

I_G - składowa przewodnościowa.

Charakter przebiegu prądu ładowania zależy w głównej mierze od procesów polaryzacyjnych występujących w badanym dielektryku. Zjawisko stopniowego zaniku prądu ładowania najczęściej nazywa się elektryczną absorpcją, a składową prądu ładowania zanikającą w czasie - składową absorpcyjną lub wprost prądem absorpcji (rys. 1c, równ. 1). Czas zaniku składowej absorpcyjnej zależy od rodzaju badanego dielektryku i zawiera się w szerokich granicach (od kilku sekund do wielu godzin, a nawet tygodni).



Rys. 1. Ładowanie dielektryku napięciem stałym
 a) obwód ładowania; b) czasowy przebieg napięcia na badanym dielektryku;
 c) czasowy przebieg prądu ładowania

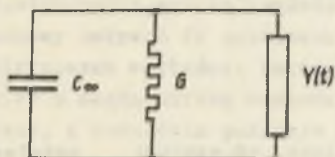
Uwzględniając skokowy charakter napięcia wymuszającego równanie prądu ładowania można zapisać w postaci:

$$I_{\Sigma}(t) = c_{\infty} \frac{dU_{\Sigma}(t)}{dt} + U Y(t) + U G \quad (2)$$

gdzie:

- C_{∞} - pojemność kondensatora z badanym dielektrykiem przy $\omega = \infty$,
- $Y(t)$ - przewodność absorbojną^{x)},
- G - przewodność,

a badany dielektryk przedstawić przy pomocy uogólnionego schematu zastępczego (rys. 2):



Rys. 2. Uogólniony schemat zastępczy badanego dielektryku

W rzeczywistym obwodzie ładowania (rys. 3) należy uwzględnić występowanie rezystancji wewnętrznej źródła zasilania R_w oraz rezystancji wejściowej miernika prądu R_{we} . Obecność rezystancji R_s rozumianej jako

$$R_s = R_w + R_{we}$$

gdzie:

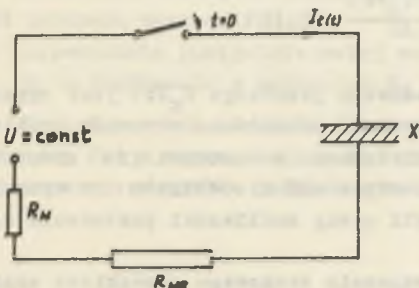
R_s - rezystancja obwodu ładowania,

sprawia, że założenie napięcia w chwili $t = 0$ nie stanowi wymuszenia o charakterze funkcji skokowej. Napięcie wymuszające w dowolnej chwili czasu wynosi bowiem:

$$U_x(t) = U - I_L(t) R_s \quad (3)$$

a równanie obserwowanego przebiegu prądu ładowania należy zapisać w postaci:

Rys. 3. Rzeczywisty obwód ładowania



$$I_L(t) = C_{\infty} \frac{d U_x(t)}{dt} + \frac{d}{dt} \int_0^t U_x(\nu) Y(t - \nu) d\nu + U_x(t) G \quad (4)$$

gdzie:

- $I_L(t)$ - wartość prądu ładowania w chwili t ,
- ν - zmienna podcałkowa oznaczająca czas.

Otrzymane z pomiaru wartości $I_L(t)$ w poszczególnych chwilach czasu są między innymi funkcją występującej aktualnie w obwodzie ładowania rezystancji R_s . A zatem odpowiedzi tego samego dielektryku, załączonego na to

^{x)} Nazwę tę zaproponowano odpowiednio do nazwy "prąd absorbojny".

samo napięcie U , lecz obserwowane przy różnych wartościach R_g mogą się znacznie różnić, a interpretacja otrzymanych wyników może prowadzić do błędnych wniosków [10].

Najwięcej informacji o własnościach dielektryku zawiera składowa absorboyjna prądu ładowania. W jej przebiegu znajdują swe odbicie procesy polaryzacyjne występujące w badanym dielektryku. Wyodrębnienie tej składowej prądu, w przypadku napięcia wymuszającego o charakterze funkcji skokowej, nie jest trudne. Poszczególne wartości prądu $I_A(t)$ można wyznaczyć (przekształcając równanie 2) jako:

$$I_A(t) = I_x(t) - U G \quad (5)$$

co wymaga przeprowadzenia pomiaru $I_x(t)$ tak długo, aż wystąpi ustalona wartość składowej przewodnościowej I_G .

W rzeczywistym obwodzie ładowania wyodrębnienie składowej absorboyjnej komplikuje się.

Poszczególne wartości $I_A(t)$ należy wyznaczać wg zależności:

$$I_A(t) = I_x(t) - C_{\infty} \frac{d U_x(t)}{dt} - U_x(t) G \quad (6)$$

Równanie (6) wobec nieznanego przebiegu $U_x(t)$ jest praktycznie nieprzydatne. Wynika stąd konieczność określenia warunków umożliwiających ocenę przybliżenia, z jakim otrzymane w rzeczywistym obwodzie pomiarowym wyniki mogą być uważane jako odpowiedź dielektryku na wymuszenie o charakterze funkcji skokowej, czyli ocenę możliwości posłużenia się zależnością w postaci równania (5).

Uzyskanie w rzeczywistym obwodzie ładowania skokowego charakteru napięcia wymuszającego oznacza konieczność zapewnienia bardzo dużej stromości narastania napięcia $U_x(t)$, czyli załączenia napięcia przy $R_g \approx 0$. Wymaga to zatem zmniejszenia do minimum rezystancji R_g obwodu ładowania. Ponieważ o wartości tej rezystancji decydują rezystancja wewnętrzna źródła zasilania R_z oraz rezystancja wejściowa miernika prądu R_{we} , obniżenie do minimum wartości R_g wymaga:

- zastosowania źródła zasilającego o bardzo małej rezystancji R_z ,
- załączania napięcia przy zwartym wejściu miernika prądu.

Wynika stąd, że zwarcie wejścia miernika prądu jest konieczne nie tylko z uwagi na jego ochronę przed skutkami przebiegającego działania składowej ładowania normalnego (wartości tej składowej przekraczają o kilka rzędów wartości pozostałych składowych). Wymaganie załączenia napięcia przy $R_{we} = 0$ jest warunkiem koniecznym (choć nie wystarczającym) traktowania otrzymanego z pomiarów przebiegu $I_x(t)$ jako odpowiedzi dielektryku na wymuszenie o charakterze funkcji skokowej. Wobec tego rozpoczęcie ob-

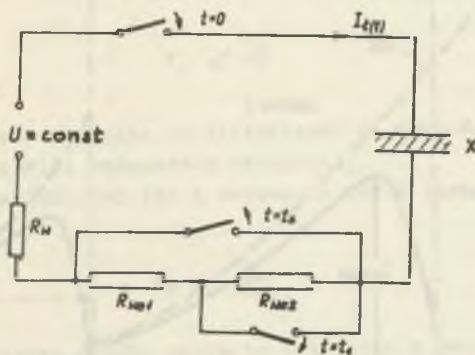
serwacji (pomiaru) może nastąpić dopiero po pewnym czasie t_z (gdzie t_z - czas trwania zwarcia wejścia miernika prądu). Można wykazać, że chwila t_z rozwarcia wejścia miernika prądu winna nastąpić po czasie wielokrotnie dłuższym niż czas t_u , który jest konieczny, aby $U_x(t) \approx U$ (np. $t_z = 10s$ gdy $t_u = 0,01s$).

Rozwarcie wejścia miernika narusza warunek stałości napięcia na dielektryku (por. równ. (3) - nagle zmiana wartości R_S z $R_S = R_W$ na $R_S = R_W + R_{W1} + R_{W2}$). Uwzględniając fakt zmiany płynącego w obwodzie prądu o 2-3 rzędy wartości, zastosowany miernik prądu winien charakteryzować się nie tylko dostatecznie wysoką oszczędnością, lecz także umożliwiać w trakcie pomiaru zmiany zakresu (w granicach co najmniej dwóch dekad) odpowiednio do rzędu mierzonych wartości. Zmiana zakresu pomiarowego miernika wiąże się również z nagłą zmianą wartości R_S i może być uważana jako czynnik zakłócający, o działaniu podobnym do rozwarcia wejścia miernika prądu.

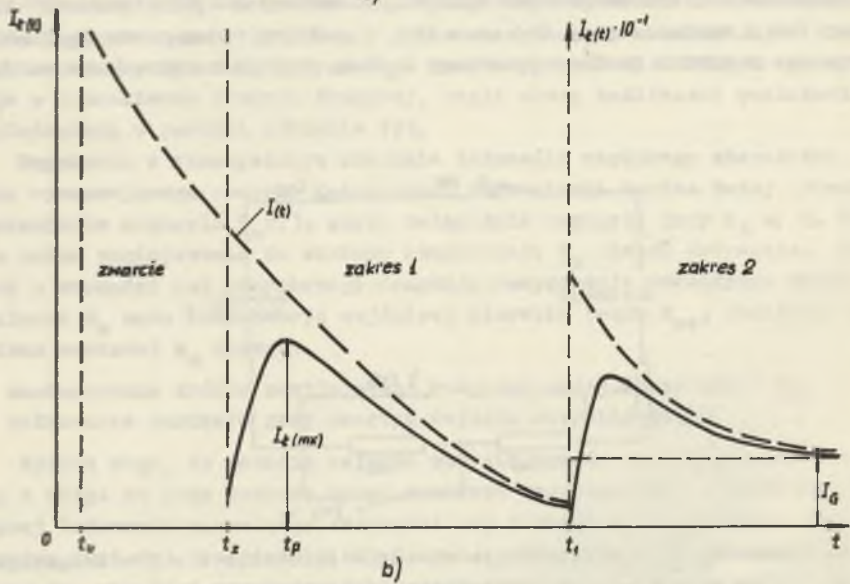
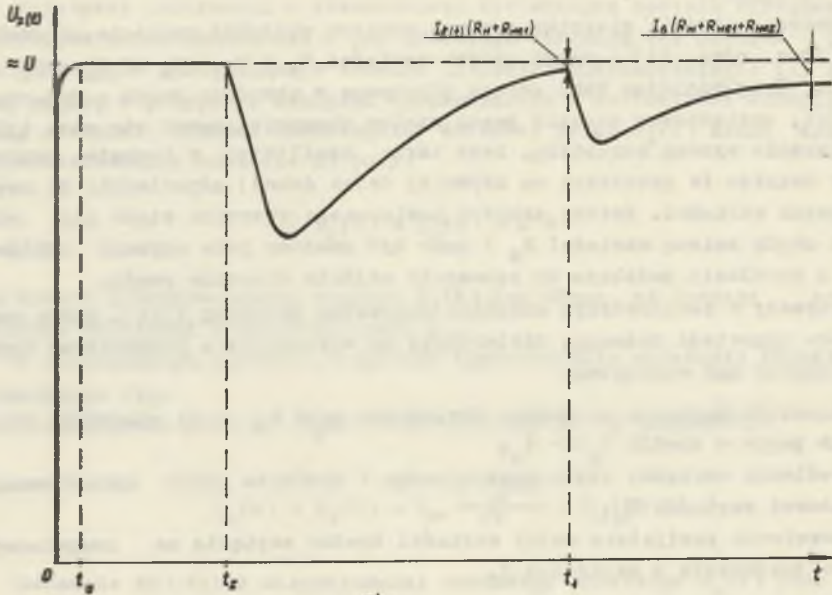
Otrzymany w rzeczywistym obwodzie ładowania przebieg $I_A(t)$, można uważać jako odpowiedź badanego dielektryku na wymuszenie o charakterze funkcji skokowej pod warunkiem:

- załączenia napięcia na badany dielektryk przy $R_S \approx 0$; rozwarcia miernika prądu w chwili $t_z \gg t_u$;
- określenia wartości błędu popełnianego w pomiarze prądu spowodowanego zmianami wartości R_S ;
- zapewnienia pomijalnie małej wartości spadku napięcia na rezystancji R_S w porównaniu z napięciem U .

Zachowanie tak sformułowanych wymagań, rozumianych jako warunek konieczny (a) i wystarczający (b) oraz (c), umożliwi ocenę wiarygodności otrzymanego w wyniku pomiaru przebiegu $I_A(t)$, przybliżonego równaniem (5).



Rys. 4. Pomiar $I_A(t)$ w rzeczywistym obwodzie ładowania $t = 0$ - załączenie napięcia ($R_S = R_W$); $t = t_z$ - rozwarcie wejścia miernika prądu ($R_S = R_W + R_{W1} + R_{W2}$); $t = t_1$ - zmiana zakresu pomiarowego miernika ($R_S = R_W + R_{W1} + R_{W2}$)



Rys. 5. Czasowe przebiegi napięcia i prądu dielektryku

Niech pomiar prądu absorpcji dielektryku odbywa się w obwodzie przedstawionym na rys. 4. Czasową zmienność napięcia $U_x(t)$, wywołaną zmianami R_g ilustruje rysunek 5a.

W chwilach $t = t_z$ oraz $t = t_1$ występują zaburzenia (nagła zmiana wartości R_g), a czasowy przebieg prądu $I_x(t)$ ma wówczas punkty nieciągłości jak na rys. 5b; charakterystyka wykreślona linią przerywaną reprezentuje prąd ładowania dielektryku przy braku zaburzeń ($R_g = 0$).

Spełnienie warunku (a) oznacza konieczność minimalizacji wartości czasu t_u (gdzie t_u - czas, po upływie którego na dielektryku wystąpi $U_x(t) = U$ - rys. 5a). O wartości tego czasu decyduje stała czasowa τ_g obwodu ładowania, której wartość w przedziale $0 < t_u$ z dobrym przybliżeniem można oszacować jako:

$$\tau_g \approx C_{\infty} R_w \quad (7)$$

Takie szacowanie wartości τ_g jest dopuszczalne, ponieważ w przedziale $0 < t_u \ll t_z$ można przyjąć, że

$$I_C(t) \gg I_A(t) + I_G$$

a czasową zmienność napięcia $U_x(t)$ przybliżyć równaniem:

$$U_x(t) \approx U \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_g}} \right)$$

Dobranie τ_g jako:

$$\tau_g \leq \frac{t_u}{7} \quad (8)$$

zapewnia ustalenie się napięcia na dielektryku na wartości 99,9% U po czasie t_u liczonym od chwili założenia napięcia.

Przekształcenie zależności (8) i zapisanie jej w postaci:

$$R_w \leq \frac{t_u}{7C_{\infty}} \quad (9)$$

stanowi kryterium doboru źródła napięcia zasilania z uwagi na dopuszczalną wartość rezystancji wewnętrznej R_w .

Równanie prądu ładowania w chwilach poprzedzających $t_z \gg t_u$ można zapisać w postaci:

$$I(t) \approx U G + U Y(t) \quad (10)$$

Prąd $I(t)$ określony równaniem (10) zawiera tylko składowe przewodnościową i absorbcyjną; wyrażenie to obowiązywałoby również dla czasów $t > t_z$, gdyby nie było zaburzeń związanych ze zmianą wartości R_S (rys. 5b). Umownie przyjęto, że $I(t)$ oznacza wartości poprawne prądu ładowania.

Błąd bezwzględny popełniany w pomiarze prądu można obliczyć jako:

$$\delta_I = I_2(t) - I(t) \quad (11)$$

gdzie:

δ_I - błąd bezwzględny pomiaru prądu,

$I_2(t)$ - mierzona wartość prądu;

$I(t)$ - poprawna wartość prądu.

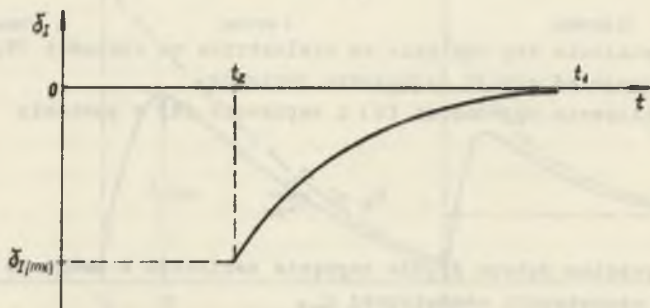
Równanie prądu $I_2(t)$ w przedziale $t_z < t < t_1$ ma postać:

$$I_2(t) = C_\infty \frac{d U_X(t)}{dt} + U_X(t)G + U Y(t) + \int_{t_z}^t \frac{d U_X(\tau)}{d \tau} Y(t - \tau) d\tau \quad (12)$$

Uwzględniając w równaniu (11) równania (12), (10) oraz (3) otrzymamy:

$$\delta_I = -C_\infty R_S \frac{d I_2(t)}{dt} - I_2(t) R_S G + \int_{t_z}^t \frac{d U_X(\tau)}{d \tau} Y(t - \tau) d\tau \quad (13)$$

Błąd δ_I jest zmienny w czasie i charakter jego przebiegu przykładowo przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Zmienność błędu δ_I w czasie

Wyznaczenie wartości δ_I w dowolnych chwilach czasu wg równania (13) wymaga przybliżenia $Y(t)$ konkretną funkcją analityczną. Przyjęcie najprostszej aproksymacji w postaci:

$$Y(t) = Y(0) e^{-\frac{t}{\tau_1}}$$

prowadzi do bardzo skomplikowanych obliczeń i nie umożliwia sformułowania prostego kryterium doboru R_S . W dalszym ciągu obliczenie błędu przeprowadzono dla wybranych chwil czasowych.

Największa wartość δ_I występuje w chwili $t = t_Z$ i wynosi:

$$\delta_I(t_Z) = \delta_{I(mx)} = -C_{\infty} R_S \left(\frac{d I_2(t)}{dt} \right)_{t_Z} - I_2(t_Z) R_S G \quad (14)$$

gdzie:

$\delta_{I(mx)}$ - największa wartość błędu bezwzględnego.

Wartość błędu względnego δ_I^o określić można jako:

$$\delta_I^o = \frac{\delta_I}{I(t)} \quad (15)$$

Uwzględniając charakter czasowych zmian δ_I oraz $I(t)$ największa wartość δ_I^o wystąpi w chwili $t = t_Z$ i wyniesie:

$$\delta_{I(mx)}^o = \frac{-C_{\infty} R_S \left(\frac{d I_2(t)}{dt} \right)_{t_Z} - I_2(t_Z) R_S G}{I_2(t_Z) + C_{\infty} R_S \left(\frac{d I_2(t)}{dt} \right)_{t_Z} + I_2(t_Z) R_S G} \quad (16)$$

gdzie:

$\delta_{I(mx)}^o$ - największa wartość względnego błędu.

Kryterium doboru R_S wyprowadzone z równania (16) mogłoby okazać się zbyt ostre (np. zapewnienie $\delta_{I(mx)} \leq 0,1$ wymaga dobrania $R_S \leq 1,1 R_n$, co utrudniałoby znacznie dobór miernika pod względem czułości). W praktyce pomiar rozpoczyna się zwykle w chwili, w której widoczny jest opadający charakter przebiegu $I_2(t)$. Dlatego też bardziej miarodajne byłoby określenie błędu pomiaru $\delta_I(t_p)$ dla tej chwili, to znaczy $t = t_p$ (rys. 5b), w której mierzona wartość $I_2(t) = I_2(mx)$ jest największa.

Tak rozumiany błąd bezwzględny pomiaru wynosi:

$$\left| \delta_{I(t_p)} \right| = \left| I_2(mx) - I(t_p) \right| \quad (17)$$

gdzie:

$\delta_{I(t_p)}$ - błąd bezwzględny pomiaru,

natomiast wartość błędu względnego $\delta_{I(t_p)}^{\circ}$ określa zależność:

$$\left| \delta_{I(t_p)}^{\circ} \right| = \left| \frac{I_{\lambda(\max)}}{UG + UY(t_p)} - 1 \right| \quad (18)$$

Żądając spełnienia warunku

$$\left| \delta_{I(t_p)}^{\circ} \right| \leq \left| \frac{\frac{\Delta U_{\text{dop}}}{R_s}}{UG + UY(t_p)} - 1 \right| \quad (19)$$

gdzie:

ΔU_{dop} - największa, dopuszczalna zmiana napięcia na dielektryku występująca w chwili $t = t_p$ (por. wymaganie (o),

kryterium doboru R_s ma postać:

$$R_s \leq \frac{\Delta U_{\text{dop}}}{1 - \left| \delta_{I(t_p)}^{\circ} \right|} \cdot \frac{1}{UG + UY(t_p)} \quad (20)$$

Dobór R_s wg równania (20) uzależniony jest od przyjętych, dopuszczalnych wartości ΔU_{dop} oraz $\delta_{I(t_p)}^{\circ}$, a także od wyrażenia $UG + UY(t_p)$, którego wartość można oszacować przeprowadzając dodatkowe pomiary. Aby uniknąć konieczności przeprowadzania dodatkowych pomiarów, można posłużyć się wartością wyrażenia $UG + UY(t)$, określoną dla $t = t_z$.

Jeśli $R_s \gg R_w$, to

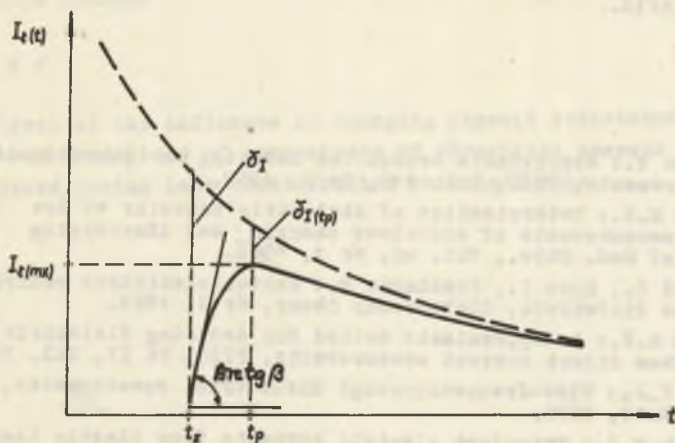
$$UG + UY(t_z) \approx \tau_s \beta$$

gdzie: $\tau_s = C_{\infty} (R_w + R_{we1}) \approx C_{\infty} R_{we1}$

$\beta = \left(\frac{dI_{\lambda}(t)}{dt} \right)_{t=t_z}$ = nachylenie przebiegu $I_{\lambda}(t)$ w chwili $t = t_z$

Wówczas zamiast błędu $\delta_{I(t_p)}$ określany byłby błąd δ_I (rys. 7), przy czym

$$\left| \delta_I \right| = \left| I_{\lambda(\max)} - \tau_s \beta \right| > \left| \delta_{I(t_p)} \right| \quad (21)$$



Rys. 7. Porównanie obliczonych błędów δ_I oraz $\delta_{I(t_p)}$

Wykorzystanie w obliczeniach wartości błędu δ_I prowadzi do nieco "zaostrzonego" kryterium doboru R_B , które wyprowadzone w analogiczny jak poprzednio sposób (równania (18) i (19)) przyjmuje postać:

$$R_B \leq \sqrt{\frac{\Delta U_{\text{dop}}}{1 - |\delta_I^0|} \frac{1}{C_{\infty} \beta}} \quad (22)$$

gdzie:

ΔU_{dop} - przyjęta, dopuszczalna zmiana napięcia na dielektryku,

δ_I^0 - przyjęta niedokładność pomiaru $I_L(t)$ spowodowana zmianą R_B ,

β - nachylenie otrzymanego z pomiaru przebiegu $I_L(t)$ w chwili $t = t_p$.

Obliczenie błędu popełnianego przy zmianie zakresu miernika prądu (dokonywanej w chwili $t = t_1$ - rys. 5b) oraz związany z tym dobór wartości R_B można przeprowadzić w podobny sposób.

Poprawny pomiar składowej absorbcyjnej prądu uwarunkowany jest spełnieniem wymagań (a), (b) oraz (c). Niedotrzymanie któregośkolwiek z wymienionych warunków (a), (b) lub (c) wymaga odpowiedniego skorygowania wartości rezystancji R_B , ponownego przeprowadzenia pomiaru oraz przeanalizowania otrzymanego rezultatu. Stwierdzenie spełnienia wszystkich trzech warunków umożliwi przybliżenie, obserwowanego w rzeczywistym obwodzie ładowania przebiegu $I_L(t)$, zależnością w postaci:

$$I_L(t) \approx I(t) = I_G + I_A(t) \quad (23)$$

z niedokładnością wynikającą z kolejno przyjmowanych przybliżeń (równania (9) oraz (22)).

LITERATURA

- [1] Adameo V.: Approximate method for deducing ac permittivity from dc measurements, PIEEE, Vol. 116, Nr 6, 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] Burial Z., Kunz I., Prochazka B.: Mereni elektricke vodivosti a polarizace dielektrik, Slaboproudy Obzor, Nr 3, 1969.
- [4] Hamon B.V.: An approximate method for deducing dielectric loss factor from direct current measurements, PIEEE, Pt II, Vol. 99, 1952.
- [5] Hyde F.J.: Wide-frequency-range dielectric spectrometer, PIEEE, Vol. 117, Nr 9, 1970.
- [6] Munick R.J.: Transient electric currents from plastic insulators, Journal of Applied Physics, Vol. 27, Nr 10, 1956 r.
- [7] Nemeth E.: Proposed fundamental characteristics describing dielectric processes in dielectrics, Periodica Polytechnica Electrical Engineering, Vol. 15, Nr 4, 1971.
- [8] Schweidler E.: Studien über die Anomalien im Verhalten der Dielektrika, Ann. der Phys., Vol. 24, 1907.
- [9] Vajda G.: Issledowanija powriezdienij izolacii, Energia, Moskwa 1968
- [10] Vajda G.: The part played by the capacitive component in the measurements of absorption current, Acta Technica Hung., T. XL, Nr 3 - 4 1962.
- [11] Whitehead J.B., Banos A.: Predetermination of the ac characteristics of dielectrics, Trans. AIEE, 1932.

Przyjęto do druku w maju 1974 r.

ВЛИЯНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАРЯДНОЙ ЦЕПИ НА ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА АБСОРБЦИИ

Резюме

Произведен анализ влияния сопротивления зарядной цепи и определены условия правильности измерения тока абсорбции с учетом этого влияния.

INFLUENCE OF CHARGING CIRCUIT RESISTANCE ON MEASUREMENT OF ABSORPTION CURRENT

Summary

An analysis of the influence of charging circuit resistance has been performed and conditions of correctness of absorption current measurement are formulated taking into consideration this influence.

Analiza wpływu rezystancji obwodu ładowania na pomiar prądu absorpcyjnego została przeprowadzona i sformułowane zostały warunki poprawności pomiaru prądu absorpcyjnego z uwzględnieniem tego wpływu.

1. WSTĘP

W artykule tym omówiono wpływ rezystancji obwodu ładowania na pomiar prądu absorpcyjnego w celu wyznaczenia współczynnika absorpcji w metodzie pomiaru prądu absorpcyjnego.

W tym celu przeprowadzono badania teoretyczne i eksperymentalne, które pozwoliły na wyznaczenie warunków poprawności pomiaru prądu absorpcyjnego.

- 1. Wzrost błędów pomiaru współczynnika absorpcji z wzrostem rezystancji obwodu ładowania.
- 2. Wzrost błędów pomiaru współczynnika absorpcji z wzrostem rezystancji obwodu ładowania.
- 3. Wzrost błędów pomiaru współczynnika absorpcji z wzrostem rezystancji obwodu ładowania.
- 4. Wzrost błędów pomiaru współczynnika absorpcji z wzrostem rezystancji obwodu ładowania.
- 5. Wzrost błędów pomiaru współczynnika absorpcji z wzrostem rezystancji obwodu ładowania.

Wyniki badań teoretycznych i eksperymentalnych zostały przedstawione w formie wykresów i tabel. Wyniki teoretyczne zostały sprawdzone eksperymentalnie.

Wnioski z badań teoretycznych i eksperymentalnych zostały sformułowane w formie wniosków. Wyniki teoretyczne zostały sprawdzone eksperymentalnie.