

Teresa SZADKOWSKA

UWAGI O WYKORZYSTANIU CHARAKTERYSTYK NAPIĘCIA
ROZŁADOWANIA DO OKREŚLENIA WSPÓŁCZYNNIKA
ABSORPCJI DIELEKTRYKÓW

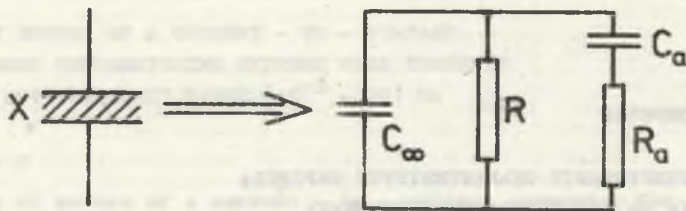
Streszczenie. W artykule przedstawiono ocenę właściwości metrologicznych znanej w literaturze metody pomiaru współczynnika absorpcji dielektryków, opartej na pomiarze charakterystyki napięcia rozładowania. Wykazano, że dla najczęściej występujących w praktyce wartości mierzonego współczynnika otrzymuje się wyniki obciążone dużym błędem. Wykazano również, że główna przyczyna dużego błędu tkwi w definicji współczynnika. Zaproponowano zmianę tej definicji, uzyskując znaczne zmniejszenie błędu przy jednoczesnym zachowaniu nie zmienionej metodyki pomiarowej. Przeprowadzono analizę wpływu wejściowej pojemności i wejściowej rezystancji miernika napięcia (stosowanego w omawianej metodzie) na błąd pomiaru współczynników absorpcji definiowanych na dwa sposoby. Wykazano, że w obu przypadkach omawiane wpływy są różne. Przedstawiono wyniki eksperymentalnej weryfikacji wniosków teoretycznych i sformułowano zalecenia praktyczne.

Badania zjawisk związanych z absorpcją (będącą wynikiem polaryzacji dielektryku umieszczonego w stałym polu elektrycznym) są tematem szeregu opracowań [1], [8], [10], wśród których najbardziej interesującymi są te, które przedstawiają propozycje wykorzystania eksperymentalnych badań absorpcji w diagnostyce izolacji [2], [3], [4], [5], [6], [9]. W stałoprądowych badaniach absorpcji najczęściej wykorzystuje się czasowe odpowiedzi dielektryku poddanego działaniu stałego pola elektrycznego. Sygnałem mierzonym może być prąd lub napięcie; można zatem mówić o metodach badań na podstawie czasowych charakterystyk prądowych lub napięciowych. W niniejszym artykule podjęto próbę oceny wybranych właściwości metrologicznych metody badania absorpcji z wykorzystaniem charakterystyki napięcia rozładowania, przedstawionej w pracy [7]. Autorzy pracy [7] proponują wyznaczenie współczynnika absorpcji k_a dielektryku (o schemacie zastępczym przedstawionym na rys. 1) na podstawie charakterystyki napięcia rozładowania.

Definicyjne równanie współczynnika absorpcji k_a ma postać:

$$k_a = \frac{C_a}{C_{\infty} + C_a}, \quad (1)$$

natomiast zasadę pomiaru k_a na podstawie przebiegu napięcia rozładowania przedstawia rys. 2.



Rys. 1. Schemat zastępczy dielektryku:

X - badany dielektryk, C_{∞} - pojemność geometryczna dielektryku (określona przez polaryzacje szybkie), R - rezystancja upływu, C_a - wypadkowa pojemność absorpcyjna dielektryku (określona przez polaryzacje wolnozmiennne), R_a - wypadkowa rezystancja absorpcyjna

Fig. 1. Equivalent diagram of dielectric:

X - tested dielectric, C_{∞} - geometrical capacitance of dielectric (determined by quick polarization), R - leakage resistance, C_a - resultant absorption capacitance of dielectric (determined by slow polarizations), R_a - resultant absorption resistance

Badany dielektryk X jest ładowany ze źródła napięcia stałego U w czasie $t = t_1$, dobranym tak, aby:

$$t_1 \ll T_a = R_a C_a \quad (2)$$

i równocześnie

$$t_1 \gg T_w = R_w C_{\infty} \quad (3)$$

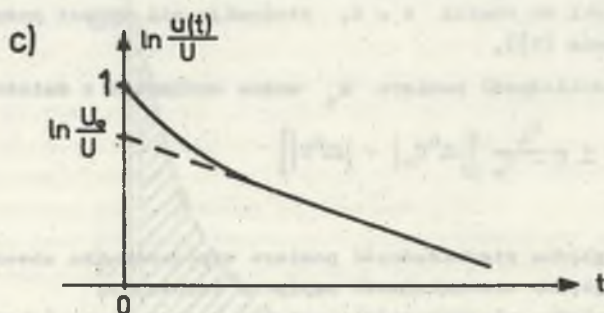
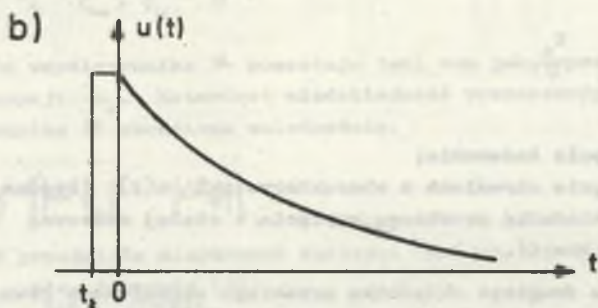
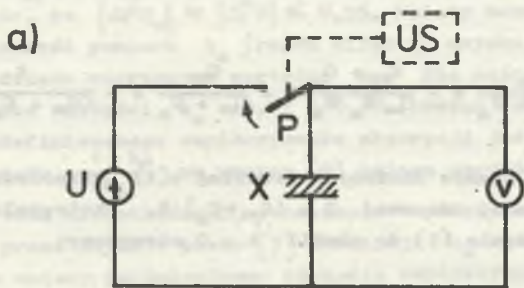
gdzie:

R_w - rezystancja wewnętrzna źródła napięcia U,

T_w - stała czasowa obwodu ładowania.

Oznacza to, że w czasie t_1 naładuje się całkowicie pojemność C_{∞} badanego dielektryku. Po czasie t_1 następuje odłączenie dielektryku od źródła i rozpoczyna się proces rozładowania zgromadzonego w pojemności C_{∞} ładunku poprzez rezystancję upływu R oraz gałąź absorpcyjną $R_a C_a$. Obserwowany na dielektryku spadek napięcia (rys. 2b) jest wypadkowym przebiegiem uwarunkowanym szybkością zaniku procesów relaksacyjnych związanych z absorpcją i rozładowywaniem się pojemności przez rezystancję upływu. Ponieważ dla większości dielektryków procesy związane z absorpcją trwają krócej niż całkowite rozładowanie pojemności przez rezystancję upływu, można przyjąć, że obowiązuje zróżnicowanie stałych czasowych wg zależności (4):

$$T_{\infty} = C_{\infty} R \gg R_a C_a = T_a \quad (4)$$



Rys. 2. Zasada pomiaru k_a z wykorzystaniem charakterystyki napięcia rozładowania;

a) schemat ideowy; U - napięcie ładowania, X - badany dielektryk, P - przełącznik, US - układ sterujący pracą przełącznika, V - układ pomiaru napięcia, b) czasowy przebieg napięcia na dielektryku w cyklu ładowanie - rozładowanie; c) opracowanie wyniku pomiaru - wyznaczenie napięcia U_0

Fig. 2. Measurement principle with a use of discharge voltage characteristic:

a) schematic diagram; U - charging voltage, X - tested dielectric, P - switch, US - control system of switch operation, V - voltage meter circuit. b) time dependence of voltage on dielectric in charging - discharging cycle; c) work out of measurement result - determination of the voltage U_0

Czasowa zależność napięcia rozładowania z uwzględnieniem warunków (2), (3) oraz (4) ma postać:

$$u(t) = U \left[\frac{C_a}{C_{\infty} + C_a} e^{-\frac{C_{\infty} + C_a}{C_{\infty} C_a R} t} + \frac{C_{\infty}}{C_{\infty} + C_a} e^{-\frac{t}{(C_{\infty} + C_a) R}} \right] \quad (5)$$

Wynika stąd, że dla czasów dłuższych przebieg $u(t)$ przechodzi w krzywą eksponencjalną o stałej czasowej $T = (C_{\infty} + C_a) R$. Ekstrapolując zatem drugi składnik wyrażenia (5) do chwili $t = 0$ otrzymamy:

$$U_0 = U \frac{C_{\infty}}{C_{\infty} + C_a} = U(1 - k_a), \quad (6)$$

a zatem

$$k_a = 1 - \frac{U_0}{U}, \quad (7)$$

gdzie:

U - napięcie ładowania;

U_0 - napięcie określone z charakterystyki $u(t)$ (rzędna wyodrębnionego składnika przebiegu napięcia o stałej czasowej $T = (C_{\infty} + C_a)R$ dla $t = 0$).

Wyodrębnienie drugiego składnika przebiegu określonego równaniem (5) można przeprowadzić, sporządzając wykres $\ln \frac{u(t)}{U} = f(t)$ i wyznaczając liniowy odcinek charakterystyki - rys. 2 c, ekstrapolując liniową część charakterystyki do chwili $t = 0$, otrzymuje się wprost poszukiwaną wartość $\frac{U_0}{U}$ (wzór (7)).

Względna niedokładność pomiaru k_a można wyznaczyć z zależności:

$$\Delta^{\circ} k_a = \pm \frac{U_0}{U - U_0} \left[|\Delta^{\circ} U_0| + |\Delta^{\circ} U| \right] \quad (8)$$

gdzie:

$\Delta^{\circ} k_a$ - względna niedokładność pomiaru współczynnika absorpcji k_a ;

$\Delta^{\circ} U$ - względna niedokładność napięcia ładowania;

$\Delta^{\circ} U_0$ - względna niedokładność napięcia rozładowania (ekstrapolowanej do chwili $t = 0$ wartości $u(t)$).

Uwzględniając we wzorze (8) zależność (7), otrzymujemy:

$$\Delta^{\circ} k_a = \pm \frac{1 - k_a}{k_a} \left[|\Delta^{\circ} U_0| + |\Delta^{\circ} U| \right] \quad (9)$$

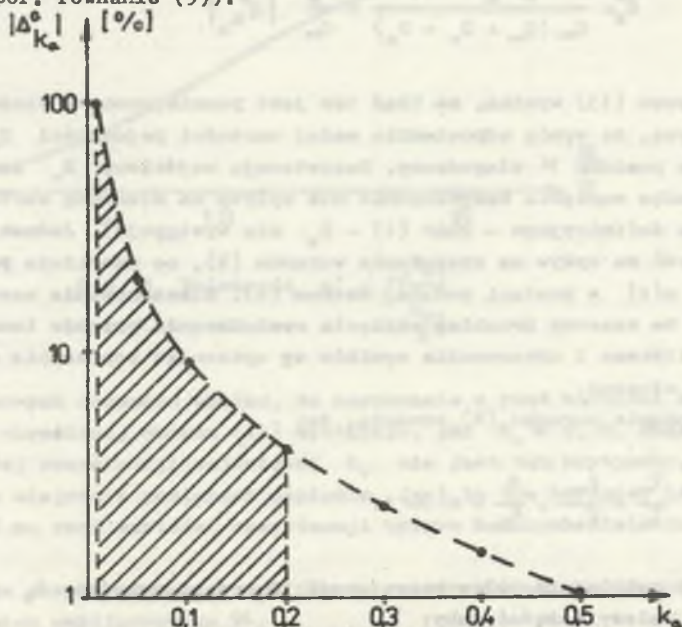
Przebieg $|\Delta^{\circ}k_a| = f(k_a)$ przedstawiono na rys. 3, przy czym w obliczeniach przyjęto, że $|\Delta^{\circ}U_0| \approx |\Delta^{\circ}U| \leq 0,5\%$. Należy zauważyć, że zadowalającą niedokładność pomiaru k_a (rzędu kilku %) uzyskuje się tylko dla pewnego przedziału mierzonych wartości k_a . Dla najczęściej występujących w praktyce wartości $k_a = 0,01 \div 0,20$ (obszar zakreskowany na rys.3) pomiar tak zdefiniowanego współczynnika absorpcji jest obaroczony dużym błędem; mnożnik $\frac{1-k_a}{k_a}$ we wzorze (9) osiąga wartości z przedziału $4 \div 99$. Tak duża niedokładność wyznaczenia współczynnika absorpcji tkwi w przyjętej przez autorów pracy [7] definicji k_a i celowe wydaje się wprowadzenie zmiany definicyjnego równania współczynnika absorpcji. Zmiana ta polegałaby na zdefiniowaniu współczynnika \mathcal{K} określonego wzorem:

$$\mathcal{K} = 1 - k_a = \frac{C_{\infty}}{C_{\infty} + C_a} = \frac{U_0}{U} \quad (10)$$

Sposób pomiaru współczynnika \mathcal{K} pozostaje taki sam jak w przypadku współczynnika absorpcji k_a . Natomiast niedokładność wyznaczonego wg wzoru (10) współczynnika \mathcal{K} określona zależnością:

$$\Delta \mathcal{K} = \pm \left[|\Delta^{\circ}U_0| + |\Delta^{\circ}U| \right] \quad (11)$$

nie zależy od przedziału mierzonych wartości \mathcal{K} (jak w przypadku współczynnika k_a - por. równanie (9)).



Rys. 3. Przebieg $|\Delta^{\circ}k_a| = f(k_a)$
 Fig. 3. Diagram $|\Delta^{\circ}k_a| = f(k_a)$

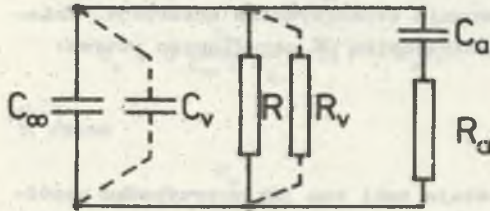
Oceniając dokładność pomiaru współczynnika absorpcji (k_a lub \mathcal{K}), należy także uwzględnić wpływ pojemności wejściowej C_v i rezystancji wejściowej R_v zastosowanego miernika napięcia, który stale bocznikuje badany dielektryk zarówno w czasie ładowania, jak i rozładowania. Schemat zastępczy badanego dielektryku z uwzględnieniem bocznikującego wpływu R_v i C_v miernika napięcia przedstawiono na rys. 4.

Pojemność wejściowa C_v miernika napięcia sumuje się z pojemnością

geometryczną C_{∞} dielektryku, zmienia wartość mierzonego współczynnika absorpcji i jest przyczyną błędów systematycznych określonego wzorem:

$$\delta_{k_a}^{\circ} = - \frac{C_v}{C_{\infty} + C_v + C_a} \quad (12)$$

Obliczając błąd systematyczny $\delta_{\mathcal{K}}^{\circ}$ spowodowany wpływem pojemności C_v w pomiarze współczynnika \mathcal{K} , otrzymamy:



Rys. 4. Bocznikujący wpływ C_v i R_v miernika napięcia

Fig. 4. Shunting influence of C_v and R_v of voltage meter

$$\delta_{\mathcal{K}}^{\circ} = \frac{C_v C_a}{C_{\infty} (C_{\infty} + C_v + C_a)} = \frac{C_a}{C_{\infty}} |\delta_{k_a}^{\circ}| \quad (13)$$

Ze wzoru (13) wynika, że błąd ten jest pomniejszony w stosunku $\frac{C_a}{C_{\infty}}$, co oznacza, że wymóg odpowiednio małej wartości pojemności C_v jest w przypadku pomiaru \mathcal{K} złagodzony. Rezystancja wejściowa R_v zastosowanego miernika napięcia bezpośrednio nie wpływa na mierzoną wartość k_a (w równaniu definicyjnym - wzór (1) - R_v nie występuje). Jednak jej skończona wartość ma wpływ na spełnienie warunku (4), co umożliwia przyjęcie równania $u(t)$ w postaci podanej wzorem (5). Niezaohowanie warunku (4) sprawia, że czasowy przebieg napięcia rozładowania opisuje inna zależność analityczna i opracowanie wyników wg opisanego poprzednio sposobu nie jest słuszne.

Spełnienie warunku (4) oznacza, że:

$$\frac{T_{\infty}}{T_a} = \frac{C_{\infty}}{C_a} \cdot \frac{R}{R_a} = n \gg 1. \quad (14)$$

Jeśli uwzględnić wpływ rezystancji R_v i pojemności C_v miernika napięcia, należy zażądać, aby:

$$\frac{T'_{\infty}}{T_a} = \frac{C_{\infty} + C_v}{C_a} \cdot \frac{R}{R_a} \cdot \frac{R_v}{R + R_v} = n' \gg 1, \quad (15)$$

gdzie:

T'_{∞} - stała czasowa z uwzględnieniem R_v i C_v miernika napięcia.

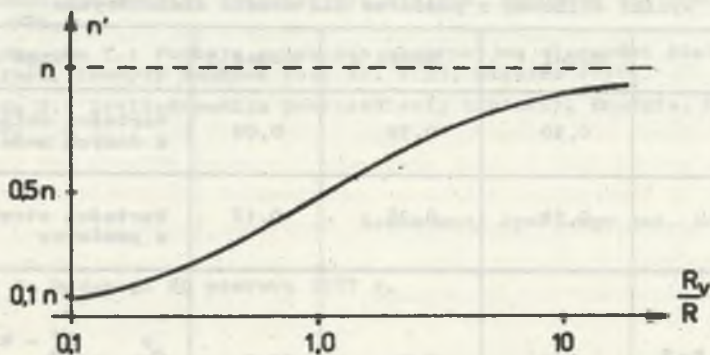
Ponieważ zawsze

$$\frac{C_{\infty} + C_v}{C_a} \cdot \frac{R}{R_a} \geq n \quad (16)$$

wyrażenie określające wymaganą wartość n' ma postać:

$$n' \approx n \frac{\frac{R_v}{R}}{1 + \frac{R_v}{R}}, \quad (17)$$

a zależność $n' = f\left(\frac{R_v}{R}\right)$ przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Zależność $n' = f\left(\frac{R_v}{R}\right)$

Fig. 5. Dependence $n' = f\left(\frac{R_v}{R}\right)$

Z przeprowadzonych rozważań wynika, że naruszenie o rząd wartości silnej nierówności określonej wzorem (15) występuje, gdy $R_v \approx 0,1R$. Oznacza to, że wymóg dużej rezystancji wejściowej R_v nie jest tak krytyczny, jak to zwykle ma miejsce w pomiarach napięcia. Jest to tym bardziej istotne, jeśli zważyć na rząd wartości rezystancji upływu badanych dielektryków.

Przeprowadzono eksperymentalną weryfikację metody pomiaru współczynnika absorpcji k_a oraz współczynnika \mathcal{K} .

Wyniki pomiarów sprawdzających zestawiono w tabelicy 1. Pomiarzy przeprowadzono dla modeli dielektryków różniących się parametrami gałęzi absorpcyjnej. Zastosowany miernik napięcia posiadał $R_V \approx 10R$ oraz $C_V \approx 0,001 C_m$.

Pomiary wykazały, że w przypadku badania dielektryków charakteryzujących się dużym współczynnikiem absorpcji można opisaną metodą wyznaczyć k_a bądź \mathcal{K} , przy czym niedokładność pomiaru w obu przypadkach jest zbliżona. Jednak pomiar małych współczynników k_a (w praktyce $k_a < 0,2$) daje wyniki obciążone dużym błędem i w takich przypadkach należy wyznaczać współczynnik \mathcal{K} .

Pomiary potwierdziły także słuszność wyprowadzonych wniosków dotyczących wpływu pojemności wejściowej C_V oraz rezystancji wejściowej R_V miernika napięcia na dokładność pomiaru współczynników k_a i \mathcal{K} . Wejściowa pojemność miernika napięcia $C_V \approx 40$ pF wprowadza pomijalnie mały błąd w pomiarze k_a i \mathcal{K} w porównaniu z błędem wynikającym z samej metody pomiaru. Podobnie rezystancja wejściowa $R_V \approx 10^{12} \Omega$ nie naruszając warunków (15) nie wpływa na dokładność.

Tabelica 1

Wyniki obliczeń i pomiarów dla modeli dielektryków

	Model 1	Model 2	Model 3	Uwagi
k_a	0,50	0,39	0,09	Wartości obliczone z danych modeli
k'_a	0,52	0,36	0,12	Wartości otrzymane z pomiarów
$ \Delta^{\circ}_{k_a} $ [%]	4,0	7,7	33,3	$\Delta^{\circ}_{k_a} = \frac{k'_a - k_a}{k_a} \cdot 100\%$
\mathcal{K}	0,50	0,61	0,91	Wartości obliczone z danych modeli
\mathcal{K}'	0,48	0,64	0,88	Wartości otrzymane z pomiarów
$ \Delta^{\circ}_{\mathcal{K}} $ [%]	4,0	4,9	3,3	$\Delta^{\circ}_{\mathcal{K}} = \frac{\mathcal{K}' - \mathcal{K}}{\mathcal{K}} \cdot 100\%$

LITERATURA

- [1] Epsztejn S.L.: Izmerienije charakteristik kondensatorow. Energia, Leningrad 1971.
- [2] Jerusalimow M.E.: Postojannyje wremieni toka absorbcii w nieodnorodnoj izolacii. Wiestn. Kijew. Polit.Inst., Ser. Elektroenergetyka, nr 10, 1973.
- [3] Jerusalimow M.E., Iljenko O.S.: Matematyczieskaja model prociesow absorbcii w nieodnorodnoj izolacii, Elektriziestwo, nr 10, 1980.
- [4] Nemeth E.: Selective Investigation of Long - Time - Constant Ranges of Polarization by DC Methods, IEE 3 th Conf. on DMMA, Birmingham 1979.
- [5] Oboloncziuk I.B., Bagaliej Ju.W., Czernowa I.A.: Osnownyje charakteristiki absorbcionnyh swojstw kondensatorow, Wiestn.Chark. Polit. Inst., nr 56, 1971.
- [6] Oboloncziuk I.B., Starusiewa S.F., Kassala W.I., Czabanowa L.W.: Prostiejszije relaksacionnyje modeli kondensatorow K 40U-9 i K 75-12 Wiestn. Chark. Polit.Inst., nr 150, 1979.
- [7] Starusiewa S.F., Moisiejewa N.A., Oboloncziuk I.B., Kassala W.I.: Opriedieleniye priedielnogo koeficienta absorbcii i effektivnogo wremieni relaksacii, Wiestn.Chark. Polit.Inst., nr 150, 1979.
- [8] Szadkowska T.: Analiza metod pomiaru funkcji charakteryzujacej wolnozmiennie polaryzacje dielektrykow stalych. Rozprawa doktorska, Gliwice 1975.
- [9] Szadkowska T.: Funkcja opisujuca absorpcyjne wlasnosci dielektrykow stalych. Zeszyty Naukowe Pol. Sl. z.53, Gliwice 1976.
- [10] Vajda D.: Issledowanija powriezdienij izolacii, Energia, Moskwa 1968.

Recenzent: Prof. mgr inż. Artur Metal

Wplynęło do Redakcji 20 czerwca 1987 r.

ЗАМЕЧАНИЯ ОБ ПРИМЕНИИ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРЯЖЕНИЯ РАЗРЯДА
К ОПРЕДЕЛЕНИЮ КОЭФФИЦИЕНТА АБСОРБЦИИ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Р е з ю м е

В статье приведена оценка метрологических свойств известного из литературы метода измерения коэффициента абсорции диэлектриков с использованием характеристики напряжения разряда. Доказано, что для более часто имеющих место на практике значений измеряемого коэффициента, получаются результаты с большими ошибками. Доказано также, что главная причина большой ошибки сохраняется при определении коэффициента. Показана целесообразность изменения определения, получая уменьшение ошибки при одновременном сохранении измеряемой методики. Дан анализ влияния входной емкости и входного сопротивления измерительного прибора напряжения (применяемого в представленном

методе) на ошибку измерения коэффициентов абсорбции определенных двумя способами. Доказано, что в обоих случаях анализируемые влияния разные. Представлены результаты экспериментальной проверки теоретических выводов и сформулированы практические рекомендации.

SOME REMARKS ON THE USE OF DISCHARGE VOLTAGE CHARACTERISTICS FOR DETERMINING ABSORPTION COEFFICIENT OF DIELECTRICS

S u m m a r y

An evaluation of metrological properties of the measurement method of dielectric absorption coefficient, known from scientific literature, based on the measurement of the discharge voltage characteristic, has been presented in the paper. It has been shown that for values of measured coefficient most often occurring in practice the results burdened with a big error are obtained. It has been proved too that the main reason of the big error is involved in the coefficient definition. The change of this definition has been suggested resulting in considerable reduction of the error and simultaneously keeping the measuring method unchanged. An analysis of influence of the voltage meter (used in this method) input capacitance and input resistance on the measurement error of the absorption coefficients defined in two ways has been carried out. It has been proved that in both cases the discussed effects are different. The results of theoretical solutions experimental verification have been presented and practical recommendations have been formulated.