

І. В. ЛАТЕНКО, В. Г. КРИКСУНОВ

ЕКВІВАЛЕНТНА СХЕМА КОНДЕНСАТОРА, ЩО ВРАХОВУЄ ЯВИЩЕ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ АБСОРБЦІЇ

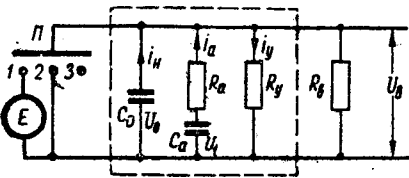
Загальні зауваження

У багатьох випадках при застосуванні конденсаторів великої ємності доводиться враховувати діелектричну абсорбцію.

Похибка, що виникає при цьому, досягає кількох десятків процентів, що не можна допустити навіть у найпростіших пристроях. Метою даної роботи є теоретичне та експериментальне обґрунтування еквівалентної схеми конденсатора з урахуванням явища абсорбції, а також аналіз результатів вимірювання параметрів еквівалентної схеми деяких конкретних типів конденсаторів.

Еквівалентна схема конденсатора

Як відомо [1], струм заряду конденсатора C зменшується з часом повільніше, ніж має бути за рівнянням



$$i_n = i_0 e^{-\frac{t}{RC}}, \quad (1)$$

де i_n — нормальний струм заряду ідеального конденсатора;

R — електричний опір кола.

Для точного врахування цього явища необхідна складна еквівалентна схема з нелінійними елементами або з розподіленими параметрами, практична цінність яких незначна. Розглянемо спрощену еквівалентну схему конденсатора

(пунктир на рис. 1), в якій наявність струму абсорбції i_a враховується елементами C_a і R_a («абсорбційні» ємність та опір), а струм витікання i_y — опором витікання R_y . Всі елементи схеми лінійні.

Рис. 1. Еквівалентна схема конденсатора з елементами зовнішніх кіл: C_a і R_a — абсорбційні ємність і опір; i_y — струм витікання; R_y — опір витікання; Π — перемикач режимів роботи; R_b — вхідний опір вимірювального приладу; E — джерело постійного струму.

Для експериментальної оцінки точності еквівалентної схеми та її придатності для практичних розрахунків треба розробити метод вимірювання R_a і C_a , а також встановити критерій точності. З цією метою проаналізуємо процеси, що відбуваються при зарядженні, розрядженні та після розмикання короткозамикаючої перемички (перемикач Π в положеннях 1, 2, 3 відповідно), а також після попереднього зарядження з наступним відімкненням джерела живлення (перемикач Π в положеннях 1, а далі 3).

Застосуємо позначення

$$\left. \begin{aligned} R_0 &= \frac{R_y R_B}{R_y + R_B}; \\ \tau_0 &= R_0 C_0; \\ \tau_1 &= R_a C_a; \\ \tau_2 &= R_0 C_a; \\ \tau_3 &= R_a C_0; \\ \alpha &= \frac{\tau_0 + \tau_1 + \tau_2}{2\tau_0\tau_1}; \\ \alpha^2 - \beta^2 &= \frac{1}{\tau_0\tau_1}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Вважаємо, що ємність C_0 заряджується і розряджується практично миттєво (при цьому нехтуємо величиною внутрішнього опору джерела живлення та паразитними індуктивностями схеми). Тоді остаточна напруга на абсорбційній ємності після зарядження протягом часу t_3 і розрядження протягом часу t_p

$$U_1 = E \left(1 - e^{-\frac{t_3}{\tau_1}} \right) e^{-\frac{t_p}{\tau_1}}. \quad (3)$$

Процеси в схемі після попереднього зарядження з наступним відімкненням джерела живлення пов'язані з перерозподілом енергії між ємностями C_0 і C_a та розрядженням їх на опір R_0 . Припустимо, що в момент відімкнення джерела живлення ємність C_0 заряджена до напруги $U_0 = E$, а ємність C_a — до напруги $U_1 = E \left(1 - e^{-\frac{t_p}{\tau_1}} \right)$. Схема в даному випадку описується операційним рівнянням

$$U_B(p) = U_0(p) - \frac{I_H}{pC_0} = U_1(p) - \frac{I_a}{pC_a} - I_a R_a = R_0 (I_H + I_a), \quad (4)$$

звідки

$$U_B(p) = \frac{(\alpha^2 - \beta^2) [U_1(p) p\tau_2 + U_0(p) p\tau_1(1 + p\tau_1)]}{p^2 - 2\alpha p + \alpha^2 - \beta^2}. \quad (5)$$

Оригінал цього виразу

$$U_B(t) = e^{\alpha t} \left\{ \left[\frac{U_1(t_3)}{\beta\tau_3} + \frac{U_0(1 + \alpha\tau_1)}{\beta\tau_1} \right] \text{sh } \beta t + U_0 \text{ch } \beta t \right\}. \quad (6)$$

Якщо $t_3 \gg r_1$, одержимо

$$U_B(t) = E e^{\alpha t} \left[\left(\frac{1}{\beta \tau_3} + \frac{1 + \alpha \tau_1}{\beta \tau_1} \right) \text{sh } \beta t + \text{ch } \beta t \right]. \quad (7)$$

Процеси в схемі після зарядження, розрядження і відімкнення замикаючої перемички аналогічні процесам, що описуються рівнянням (6), але за умови, що $U_0 = 0$, а $U_1 = U_1(t_3; t_p)$,

$$U_B(t) = \frac{U_1(t_3; t_p)}{\beta \tau_3} e^{\alpha t} \text{sh } \beta t. \quad (8)$$

Назвемо напругою абсорбції U_a максимум рівняння (8), а часом абсорбції t_a час з моменту відімкнення короткозамикаючої перемички до моменту досягнення цього максимуму. Легко показати, що при прийнятих позначеннях (2) ці величини дорівнюють

$$t_a = \frac{1}{2\beta} \ln \left(\frac{\alpha - \beta}{\alpha + \beta} \right) = \frac{1}{\beta} \text{Arth} \left(- \frac{\beta}{\alpha} \right); \quad (9)$$

$$U_a = U_1 \left(\frac{\alpha - \beta}{\alpha + \beta} \right)^{\frac{\alpha}{2\beta}} \sqrt{\frac{\tau_2}{\tau_3}}. \quad (10)$$

Вирази (9) і (10), як буде видно далі, дозволяють намітити метод вимірювання сталої часу r_1 , але не розв'язують питання про вимірювання C_a та R_a . Така можливість виявляється, якщо відоме значення напруги на конденсаторі в режимі, що описується рівнянням (7) ($t_3 \gg \tau_1$; $U_1 = U_0 = E$, розряд на опір R_0) в момент часу, що відповідає часу абсорбції (початок відліку часу — момент відімкнення джерела живлення). Відношення цієї напруги до напруги абсорбції

$$k = \frac{E}{U_1(t_3; t_p)} \left(1 + \frac{\tau_3}{\tau_1} \right). \quad (11)$$

Оцінити вплив абсорбційних параметрів R_a і C_a на процеси в схемі з конденсатором-нагромаджувачем можна за допомогою коефіцієнта абсорбції k_a , під яким будемо розуміти відношення напруги абсорбції U_a до остаточної напруги на абсорбційній ємності U_1 . Із співвідношення (9) випливає

$$k_a = \frac{U_a}{U_1} = \left(\frac{\alpha - \beta}{\alpha + \beta} \right)^{\frac{\alpha}{2\beta}} \cdot \sqrt{\frac{\tau_2}{\tau_3}}. \quad (12)$$

Експеримент

Із рівнянь (9) і (12) видно, що критерієм точності еквівалентної схеми може бути постійність часу абсорбції t_a і коефіцієнта абсорбції k_a при варіаціях напруги джерела живлення E , часу зарядження t_3 і розрядження t_p .

Із співвідношень (3) і (10) випливає, що можна виміряти сталу часу абсорбції τ_1 , якщо зроблено два вимірювання напруги абсорб-

ції при однаковому часі зарядження і різних часах розрядження,

$$\tau_1 = \frac{t_{p1} - t_{p2}}{\ln U_{a2} - \ln U_{a1}}. \quad (13)$$

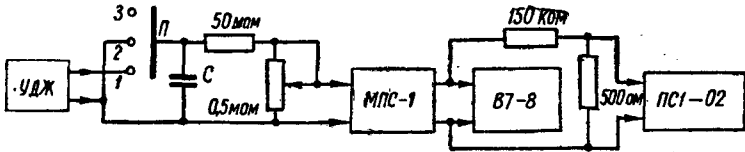


Рис. 2. Схема для вимірювання абсорбційних параметрів конденсатора: УДЖ — універсальне джерело живлення; МПС-1 — мілівольтметр постійного струму; ПС1-02 — самопишучий мілівольтметр; В7-8 — цифровий вольтметр.

Якщо відомий коефіцієнт k , можна визначити сталу часу

$$\tau_3 = R_a C_0 = \tau_1 \left(K \frac{U_1}{E} - 1 \right) = \tau_1 \left[K \left(1 - e^{-\frac{t_3}{\tau_1}} \right) e^{-\frac{t_p}{\tau_1}} - 1 \right]. \quad (14)$$

Якщо відомі τ_1 і τ_3 , можна визначити опір витікання R_y , вхідний опір вольтметра R_v і ємність конденсатора C_0 , знайти елементи R_a і C_a за рівняннями (2).

Була прийнята схема вимірювання, наведена на рис. 2.

Оброблені результати вимірювань параметрів еквівалентної схеми кількох, екземплярів конденсаторів, що випускаються нашою промисловістю, наведені в таблиці. Час зарядження приймали рівним $t_3 = 60$ хв, а напругу джерела живлення $E = 100$ в.

Для ілюстрації на рис. 3 наведені графіки зміни напруги на конденсаторах № 2 і 4 при часі зарядження 1 год і розрядження 1,5; 10 та 15 хв. Графіки для інших конденсаторів аналогічні.

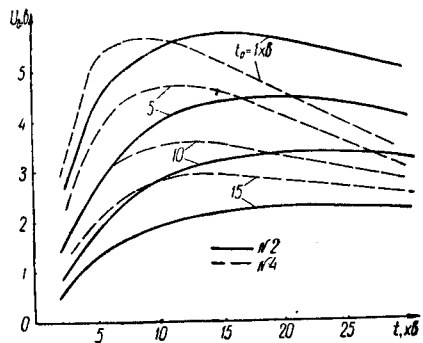


Рис. 3. Залежність напруги на конденсаторах № 2 і 4 від часу після зарядження та розрядження.

Висновки

1. Спрощений (лінійний) варіант еквівалентної схеми конденсатора відбиває явище абсорбції з точністю, достатньою для практичних розрахунків.

2. Описаний метод вимірювань з високою чутливістю і точністю дозволив виявити деякі відхилення результатів вимірювань від сподіваних при лінійній еквівалентній схемі. Ці відхилення прояв-

Таблица

Тип конденсатора	t_p	t_a	$V_a / E \%$	τ_1	τ_3	C_0 мкФ	R_y	R_o	R_a	C_a мкФ	k_a %
	хв			хв			мом				
МБГП-2-160-20-II	1	14	5,51	14,8	37,5	21,1	16	12,1	106	7,86	6,9
	5	17	4,11								
	10	20	3,14								
	15	22	2,1								
МБГП-2-160-20-II	1	14	5,79	15,8	77,4	18,5	300	43	250	3,76	6,46
	5	15,5	4,53								
	10	19	3,39								
	15	23	2,37								
МБГП-2-200-10-II	1	10	7,54	12,1	25,6	9,8	600	46,1	157	4,7	10,8
	5	11	5,21								
	10	12,5	3,6								
	15	14	2,38								
МБГП-1-200-10-II	1	9	5,73	21,8	83,5	9,2	1100	48	544	3,7	5,5
	5	11	4,79								
	10	14	3,67								
	15	14	3,0								
МБГО-2-160-30-II	1	23	9,1	23,4	36,8	31,9	80	31,8	69	20,2	16,75
	5	25	7,6								
	10	20	6,25								
	15	30	4,94								
КЭГ-2-300-50	0,1	10	14,7	3,45	15,7	57	45	23,7	16,5	11	19,1
	1	14,5	8,55								
	2	17	6,78								
	3	20	5,4								

ляються в деякій зміні часу абсорбції та коефіцієнта абсорбції при варіаціях t_3 , t_p і E .

3. Коефіцієнт абсорбції має найбільше значення порядку 20% у електролітичних та металоплівкових конденсаторів типу МБГО і найменше у конденсаторів плівкового типу МПГО, МПГ-II, ФТ і т. ін. Конденсатори типу МПГО мають коефіцієнт абсорбції порядку десятих часток процента, а у конденсаторів типу МПГ-II і ФТ при розглянутій схемі вимірювань абсорбційні явища не виявлені.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ренне В. Т., Электрические конденсаторы, Госэнергоиздат, 1959

I. V. LATENKO, V. G. KRYKSUNOW

THE EQUIVALENT CIRCUIT OF THE CAPACITOR WITH THE ACCOUNTS OF DIELECTRIC ABSORPTION EFFECT

S u m m a r y

The equivalent circuit of capacitors with the account of dielectric absorption effect is analysing. The method and results of measuring of equivalent circuit's parameters for some type of capacitors are described. The error carrying in by capacitor accumulators may be calculated.