

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

А. Г. ГУКАСЯН, М. А. КАРАПЕТЯН, В. С. СИМОНЯН

ПОГРЕШНОСТИ $L-C$ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ

В [1-3] предложены две измерительные цепи (рис. 1), которые в дальнейшем для краткости будут названы $L-C-I$ и $L-C-II$ цепями. В указанных работах приведен качественный анализ систематических методических погрешностей измерений при условии применения генератора со стабилизированным выходным напряжением фиксированной частоты. В настоящей статье изложены результаты количественного анализа методических погрешностей $L-C$ цепей, вызванных пренебрежением потерей энергии в образцовой катушке и нестабильностью частоты генератора.

Фаза выходного напряжения U_2 (рис. 1, а) без учета сопротивления r_0 при фиксированной частоте генератора равна:

$$\phi_2 = \arctg \frac{x_2}{r_2} = \arctg (\tg \phi_r) = \phi_r, \quad (1)$$

т. е. углу потерь испытуемого образца. С учетом сопротивления r_0 и нестабильности частоты генератора фаза и модуль напряжения U_2 определяются из выражений:

$$\phi_2' = \arctg \frac{\frac{\tg \phi_r}{m} + \frac{a(1-b)}{(1+a^2)(1+b)}}{1 + \frac{1}{m} - \frac{1-b}{(1+a^2)(1+b^2)}}; \quad (2)$$

$$U_2' = \frac{mU_1}{\sqrt{\left| (1+m)(1+a^2) - m \frac{1+b}{1-b} \right|^2 + \left| (1+a^2)\tg \phi_r + am + \frac{1-b}{1+b} \right|^2}}, \quad (3)$$

где $m = C_0/C_x$; $a = 1/Q_0$; Q_0 — добротность образцовой катушки; $b = \Delta f/f$.

Для вывода формул (2) и (3) принято, что при малых колебаниях частоты генератора $f = f_0 \pm \Delta f$: C_x и $\tg \phi_r$ испытуемого образца остаются постоянными; сопротивления образцовых элементов изменяются согласно выражениям $x_1 = x_0 \pm \Delta x_1$ и $x_2 = x_0 \pm \Delta x_2$; имеют место равенства $\Delta x_1 = b x_0 = \Delta x_2$. Абсолютная погрешность измерения угла по-

терь $\Delta\delta$ испытуемого образца, вызванная эквивалентным активным сопротивлением катушки r_0 и нестабильностью частоты генератора на $\pm \Delta f$, определяется разностью

$$\Delta\delta = \delta_2 - \delta_1. \quad (4)$$

С целью оценки частотной методической погрешности измерительной цепи нестабильность частоты примем равной $\pm 1\%$, хотя, в действительности, величина нестабильности частоты предопределяется типом использованного генератора. Результаты подсчета погрешностей $\Delta\delta$ при $b = \pm 0,01$ и различных значениях m и α приведены в табл. 1; причем, верхние цифры соответствуют положительному значению b , нижние — отрицательному.

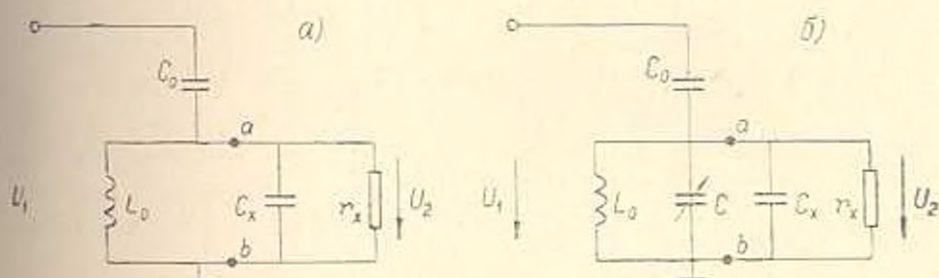


Рис. 1. Схемы измерительных цепей: а—L—C—I; б—L—C—II

При пользовании прибором с измерительной цепью L—C—I искомая емкость испытуемого образца пересчитывается по формуле:

$$C_x = \frac{U_1 C_0}{U_2 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_1}}. \quad (5)$$

полученной при пренебрежении сопротивлением r_0 и фиксированной частоте f_0 . В действительности измеряется емкость

$$C_x = \frac{U_1}{U_2} \frac{C_0}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \phi_1}}. \quad (6)$$

Погрешность измерения емкости в процентах определяется из выражения:

$$\delta\% = \frac{C_1 - C_x}{C_1} \cdot 100\% = \left\{ \frac{U_2}{U_1} \sqrt{\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \phi_1}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_1}} - 1 \right\} \cdot 100\%. \quad (7)$$

Результаты подсчета погрешностей $\delta\%$, вызванных сопротивлением r_0 и нестабильностью частоты, при $b = \pm 0,01$ и различных значениях m и α приведены в табл. 1. Величины погрешностей, вызванных только нестабильностью частоты в идеализированной цепи ($r_0 = 0$, $\alpha = 0$), приведены в последних четырех строках таблицы.

Таблица 1

α	$\lg z_0$	$m=0,01$			$m=0,1$			$m=1$		
		0,1	1,0	10	0,1	1,0	10	0,1	1,0	10
0,100	$\Delta\delta$	+3'	+1'10"	-4"	+30'	+11'30"	-40"	+5'7'20"	+1'0'50"	-6'
	$\varepsilon_c \cdot 10^6$	+3'20"	+1'20"	+4"	+34'40"	+14'50"	+39"	+5'45'20"	+3'2'	+6'39"
		-0,010	-0,050	-0,0200	-0,01	-0,40	-0,100	-0,50	-4,45	-0,97
0,010	$\Delta\delta$	-0,040	-0,070	-0,0100	-0,40	-0,60	-0,100	-4,00	-5,00	-1,00
	$\varepsilon_c \cdot 10^6$	+12"	-10"	+20"	+2'35"	-2'	-20"	+24'	-18'30"	-16'26"
		+25"	+30"	+4"	+4"	+5'10"	+39"	+42"	+52'5"	+6'59"
0,002	$\Delta\delta$	-0,020	-0,012	-0,0100	-0,20	-0,15	-0,100	-0,20	-2,50	-0,13
	$\varepsilon_c \cdot 10^6$	+0,019	+0,005	-0,0010	+0,19	+0,05	-0,010	+1,90	+0,50	-0,10
		0	-10"	-4"	0	-3'	-41"	-10"	-47'40"	-7'19"
0	$\Delta\delta$	+8'	+4"	+20"	+1'20"	+3'40"	+39"	+14"	+38'10"	+6'49"
	$\varepsilon_c \cdot 10^6$	-0,020	-0,010	-0,0010	-0,20	-0,10	-0,006	-1,90	-1,08	-0,04
		+0,020	+0,010	+0,0002	+0,20	+0,09	+0,001	+2,00	+0,90	+0,01
0	$\Delta\delta$	0	-8"	-21"	-40"	-3'30"	-41"	-6'40"	-30'	-6'46"
	$\varepsilon_c \cdot 10^6$	+4"	+20"	+5"	+20"	+2'30"	+39"	+6'44"	+34'40"	+6'44"
		-0,020	-0,010	-0,0002	-0,20	-0,10	-0,002	-1,90	-1,00	-0,02
		+0,020	+0,010	+0,0002	+0,20	+0,10	+0,002	+2,00	+1,00	+0,02

Для определения систематических методических погрешностей измерений δ_x и C_x , обусловленных только пренебрежением сопротивлением r_0 , необходимо в выражениях ψ_2 и U_2' подставить $b = 0$ и воспользоваться формулами (4) и (7).

Рассмотрение табл. 1 приводит к выводу, что при $m < 1$ и $a < 0,01$ предложенная измерительная цепь может быть с успехом применена для измерений угла потерь и емкостей, особенно, при малых добротностях испытываемых материалов.

Условие $a \leq 0,01$ удается осуществить при повышенных и высоких частотах. При частоте 50 Гц добротность L—C контура получается не лучше десяти. Из табл. 1 следует, что при этом должно быть соблюдено условие $m \leq 0,1$. Если питание схемы осуществить из электросети, где частота колеблется только на $\pm 0,4\%$, то погрешности будут значительно меньше данных табл. 1.

Перейдем к анализу цепи L—C—П. Если емкости C и C_1 объединить в одну $C_1 = C + C_1$, то цепь рис. 1, б совпадает с цепью рис. 1, а для случая $\operatorname{tg} \delta_x = 1$. Следовательно, величина $\Delta \delta$ может быть определена по выражению (4) при $\operatorname{tg} \delta_x = 1$ (см. табл. 1). Погрешности $\pm \Delta$ приведет к ложной индикации фазы 45° , тогда, как действительная фаза

$$\psi_2 = 45^\circ \pm \Delta \delta.$$

При этом

$$\frac{x^*}{r_1} = \operatorname{tg} (45^\circ \pm \Delta \delta). \quad (8)$$

Это приводит к погрешности измерения C_1 и r_1 . Так как величина емкости C_1 при малой нестабильности частоты остается постоянной, то погрешности измерения C_1 обуславливается неточной настройкой переменной емкости C . Следовательно, абсолютная погрешность измерения C_1 равняется абсолютной погрешности установления C_1 , т. е. $\Delta C_1 = \pm \Delta C$, и искомая емкость

$$C_x = C_1 - C' = C_1 \pm \Delta C_1 - (C \pm \Delta C) = C_1 - C \quad (9)$$

определяется без погрешностей.

Для определения погрешности измерения r_x воспользуемся формулой

$$U_2 = \frac{U_1 r_1 x}{x_0 \sqrt{r_1^2 + x^2}}. \quad (10)$$

взятой из [3].

В условиях нестабильности частоты и при наличии сопротивления r_0 величины U_2 и сопротивлений, входящих в (10), изменяются. Совместным решением (8) и (10) находим формулу r_x и относительную погрешность его измерения:

$$\varepsilon_{r\%} = \left\{ 1 - \frac{U_2 \sqrt{2}}{U_2} \cdot \frac{\operatorname{tg}(45^\circ \pm \Delta\delta)}{1 - \operatorname{tg}^2(45^\circ \pm \Delta\delta)} \right\} \cdot 100\% \quad (11)$$

Результаты подсчета погрешностей измерения r , приведены в табл. 2, причем значения $\Delta\delta$ взяты из табл. 1 (при $\operatorname{tg} \delta = 1$).

Таблица 2

α	$m = 0,01$	$m = 0,1$	$m = 1$
0,100	-0,0679	-0,681	-3,879
	-0,0790	-0,882	-10,6906
0,010	+0,0300	+0,0971	-1,9957
	-0,02599	-0,0994	2,0266
0,002	+0,0120	+0,1241	+0,3044
	+0,0220	+0,007427	+2,1812
0	+0,0070	-0,012388	-0,0781
	0,0210	-0,0353	+2,3812

На основании формулы [3]

$$\operatorname{tg} \delta_x = 1 + \beta = 1 + \frac{C}{C_x} \quad (12)$$

можно найти выражение для подсчета погрешностей измерения $\operatorname{tg} \delta_x$.

При учете нестабильности частоты и сопротивления r_0 тангенса фазы вторичного напряжения можно записать следующим образом:

$$\operatorname{tg} \delta_x = 1 + \frac{C - \Delta C}{C_x} \quad (13)$$

Следовательно, погрешность измерения $\operatorname{tg} \delta_x$ определится из выражения:

$$\varepsilon_{\operatorname{tg} \delta_x \%} = \frac{\operatorname{tg} \delta_x - \operatorname{tg} \delta_{x\kappa}}{\operatorname{tg} \delta_{x\kappa}} \cdot 100\% = \frac{\Delta C}{C_x} \cdot 100\% \quad (14)$$

Нетрудно убедиться, что (14) совпадает с (7), если в последней подставить $\operatorname{tg} \delta_x = 1$. Это значит, что результаты расчета погрешностей измерения C_x схемой $L-C-II$, приведенные в табл. 1 (и столбцах при $\operatorname{tg} \delta = 1$), являются также погрешностями измерения $\operatorname{tg} \delta_x$ схемой $L-C-II$.

Вышесказанное дает основание утверждать, что приборы, использующие предложенные нами $L-C$ измерительные цепи, могут быть с успехом применены для измерения или контроля величин емкости и угла потерь диэлектриков низкой добротности.

Հ. Գ. ՉՈՒԿԱՅԱՆ, Մ. Ս. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ, Վ. Ս. ՍԻՄՈՆՅԱՆ

L—C ՉԱՓԻՉ ՆՂԹԱՆԵՐԻ ՍԽԱԼԱՆՔՆԵՐԸ

Ա Մ Փ Ի Ն Փ Ի Ն Մ

Կատարված է L—C չափիչ շղթաների մեթոդական սխալների թանա-
կական անալիզ, որոնք առաջանում են նմուշային կոճուղի էներգիայի կորուստ-
ները և զինեքատորի հաճախության անկայունությունն արհամարելիս:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Карапетян М. А.* Метод измерения емкостей конденсаторов низкой добротности. «Электричество», № 8, 1968.
2. *Карапетян М. А., Симонян В. С., Гукасян А. Г.* Метод непрерывного измерения угла потерь конденсаторов. «Известия АН Арм. ССР (серия Т. Н.)», т. XXIII, № 1, 1970.
3. *Карапетян М. А., Симонян В. С.* Измерение емкости и тангенса угла потерь диэлектриков с низкой добротностью. «Электричество», № 10, 1969.