

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ  
ФАЗОМЕТРИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ЕМКОСТИ И ТАНГЕНСА УГЛА  
ПОТЕРЬ КОНДЕНСАТОРОВ**

**Б.М. Мамиконян, Д.С. Никогосян**

*Национальный политехнический университет Армении, Гюмрийский филиал*

Описано устройство для измерения электрических параметров низковольтных конденсаторов, основанное на фазометрическом методе раздельного определения емкости и тангенса угла потерь. Представлены принципиальная электрическая схема устройства, а также векторная диаграмма токов и напряжений измерительной цепи. Отличительной особенностью устройства является то, что в нем носителем информации об измеряемых параметрах является не ток или напряжение, а угол фазового сдвига между двумя выходными синусоидальными напряжениями измерительной цепи, который можно измерить с высокой точностью методом дискретного счета. В устройстве реализован структурно-алгоритмический метод с временным разделением канала измерения, получены алгоритмы раздельного определения измеряемых параметров. Основное содержание статьи посвящено разработке методики расчета параметров элементов измерительной цепи. В результате расчета обеспечиваются требуемые диапазоны измерения емкости и тангенса дельта исследуемых конденсаторов. Методика расчета сопровождается численным примером применительно к конкретным диапазонам измерения. Исследована чувствительность преобразования  $\Delta\varphi = f_1(C_x)$  и  $\Delta\varphi = f_2(tg\delta)$ . Показано, что максимальная чувствительность получается в середине шкалы - у отметки  $\varphi = 45^0$ , и уменьшается по мере удаления от этой отметки, принимая минимальные значения в начале и конце шкалы. Разработанное устройство может быть использовано также для измерения параметров пассивных электрических двухэлементных двухполосников любой конфигурации, обеспечивая их раздельное определение.

**Ключевые слова:** конденсатор, параметр, измерение, фаза, измерительная цепь, чувствительность, методика расчета.

**Введение.** Низковольтные конденсаторы, предназначенные для применения в радиоэлектронной аппаратуре, составляют около 25% от всех элементов схем [1, 2]. Поэтому исследования, посвященные методам и средствам измерения и контроля их характеристик, были и остаются актуальными. Электрические характеристики конденсатора определяются его конструкцией и свойствами используемого диэлектрика. Основными параметрами конденсаторов являются

номинальная емкость  $C_x$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $tg\delta$ . Конкретное значение  $tg\delta$  конденсатора зависит от типа диэлектрика и его качества, а также от температуры окружающей среды: как правило,  $tg\delta$  имеет минимум в области комнатных температур, при изменении температуры  $tg\delta$  может изменяться в несколько раз [3, 4]. Для широко используемых керамических, полистироловых, фторопластовых конденсаторов сопротивление изоляции больше  $3 \cdot 10^9 \text{ Ом}$ , а  $tg\delta$  находится в пределах от 0,0005 (для фторопластовых) до 0,035 (для керамических) [5-7]. Значение  $tg\delta$  зависит также от частоты переменного тока, на которой он измеряется: в основном его измеряют при частоте синусоидального тока 1000 Гц. Измерение  $C_x$  и  $tg\delta$  проводят при подаче на конденсатор переменного синусоидального напряжения, значение которого не должно превышать 5 В [8].

Для измерения  $C_x$  и  $tg\delta$  эквивалентную схему конденсатора представляют как идеальный конденсатор с последовательно включенным активным сопротивлением (последовательная схема) или как идеальный конденсатор с параллельно включенным активным сопротивлением (параллельная схема), при этом последовательная схема предпочтительна при малых потерях, параллельная – при больших. Однако от схемы замещения зависят только расчетные формулы, а результат измерения мощности диэлектрических потерь остается неизменным [9]. Перечень методов измерений  $C_x$  и  $tg\delta$  приведен в [8]. В области низких частот (до  $10^7 \text{ Гц}$ )  $C_x$  и  $tg\delta$  измеряют обычно методом уравнивающего преобразования с помощью мостовых схем переменного тока [8, 10]. Данный метод сложен в реализации, требует наличия, как минимум, двух прецизионных регулируемых и градуированных элементов для уравнивания моста. Кроме того, при этом методе отсутствует непосредственный выходной электрический сигнал для сопряжения измерителя с современными вычислительными средствами обработки информации и использования результата измерения в системах управления. Поэтому имеются многочисленные разработки аналоговых и цифровых измерителей  $C_x$  и  $tg\delta$ , использующих метод прямого преобразования [11-13]. Однако в этих устройствах формулы для определения  $C_x$  и  $tg\delta$  требуют измерения нескольких параметров сигналов, которые в основном являются потенциальными либо токовыми, что увеличивает аппаратные затраты и снижает помехозащищенность измерения. Указанных недостатков лишено устройство, основанное на фазометрическом методе, в котором используются только фазовые сигналы [14, 15].

**Объект исследования.** На рис. 1а представлена упрощенная принципиальная схема фазометрического измерителя  $C_X$  и  $tg\delta$  низковольтных конденсаторов. Исследуемый реальный конденсатор 1 представлен своей емкостью  $C_X$  и эквивалентным параллельным сопротивлением (ЭПС)  $R_X$ , изображающим активные потери энергии в конденсаторе. Конденсатор, последовательно соединенные с ним основной резистор  $R_1$ , дополнительный резистор  $R_2$  и электронный переключатель 2 образуют измерительную цепь (ИЦ) 3, подключенную к генератору синусоидального напряжения 4. ИЦ имеет два выходных напряжения: напряжение своих зажимов ( $U_S$ ) и напряжение исследуемого объекта ( $U_X$ ), которые приложены ко входам измерителя разности фаз двух переменных напряжений 5, выход которого соединен с вычислительным устройством 6. Информативным параметром выходного сигнала ИЦ является угол фазового сдвига  $\varphi$  между напряжениями  $U_S$  и  $U_X$ . Векторная диаграмма токов и напряжений ИЦ (рис. 1б) построена для исходного положения переключателя, при котором дополнительный резистор  $R_2$  не участвует в формировании выходного сигнала. Диаграмма построена по формулам

$$U_S = I_1 + U_X = I_1 + I_R R_X, \quad I_S = I_R + I_C,$$

где  $I$  - вектор (комплекс) измерительного тока;  $I_R$  и  $I_C$  - векторы токов через  $R_X$  и  $C_X$  соответственно.

Тангенс угла потерь  $tg\delta$  в случае параллельной схемы замещения конденсатора определяется как (рис. 1б)

$$tg\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{U_X}{R_X \cdot U_X / X_C} = \frac{X_C}{R_X} = \frac{1}{\omega R_X C_X}, \quad (1)$$

где  $\omega$  - угловая частота генератора 4.

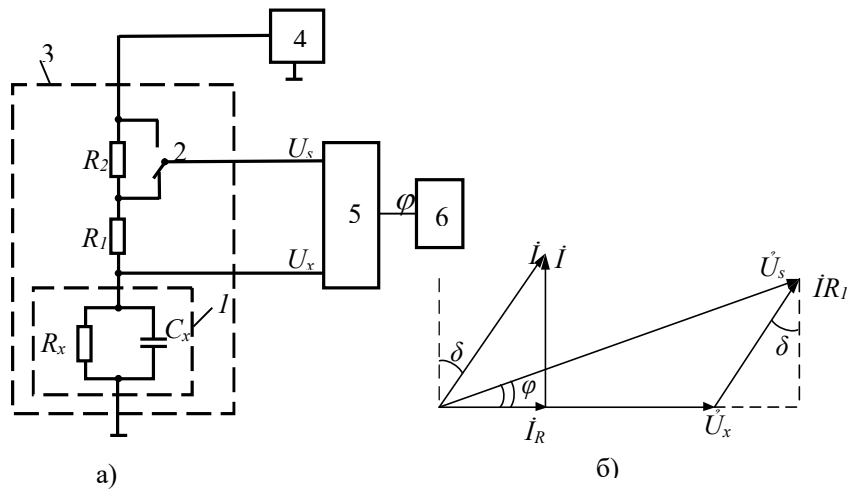


Рис. 1. Упрощенная структурная схема измерителя параметров конденсатора (а); векторная диаграмма токов и напряжений (б)

Представим  $C_x$  и  $tg\delta$  через угол фазового сдвига  $\varphi$ . Из векторной диаграммы получаем выражения

$$tg\varphi_1 = \frac{\omega R_1 R_x C_x}{R_1 + R_x}, \quad tg\varphi_2 = \frac{\omega (R_1 + R_2) R_x C_x}{R_1 + R_2 + R_x}, \quad (2)$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  - значения угла  $\varphi$  в первом и втором положениях переключателя соответственно.

Путем несложных преобразований из (2) получаем

$$C_x = \frac{R_2}{\omega R_1 (R_1 + R_2)} \cdot \frac{1}{ctg\varphi_1 - ctg\varphi_2}, \quad (3)$$

$$tg\delta = ctg\varphi_2 - \frac{R_1}{R_2} (ctg\varphi_1 - ctg\varphi_2). \quad (4)$$

Видно, что формулы (3) и (4) позволяют осуществлять раздельное определение  $C_x$  и  $tg\delta$  исследуемого конденсатора, при этом необходимо измерить только углы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , что выполняется одними и теми же аппаратными средствами, к тому же фазовый угол, в отличие от аналоговых сигналов, может быть измерен непосредственно с высокой точностью методом дискретного счета. В реализованном образце измерителя роль блоков 5 и 6 рис. 1а выполняет программируемый микроконтроллер, который осуществляет управление процессом измерения, измеряет углы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  и по формулам (3) и (4) вычисляет значения  $C_x$  и  $tg\delta$ .

**Методы исследования.** Сопротивления резисторов  $R_1$  и  $R_2$  вычисляются исходя из заданного предела измерения устройства. С учетом приведенных во введении данных в разработанном устройстве выбраны следующие диапазоны измерения:

- $C_X = 0,001...0,1 \text{ мкФ}$ ;
- $tg\delta = 0,0005...0,05$ .

Теоретически, в зависимости от значений  $C_X$  и  $R_X$ , угол  $\varphi$  может находиться в любой точке в пределах  $0^0 \leq \varphi \leq 90^0$ . Однако, учитывая особенности тангенсных и котангенсных функций, с целью обеспечения приемлемой чувствительности измерения, целесообразно, чтобы угол  $\varphi$  не выходил за пределы  $3^0 \leq \varphi \leq 87^0$ , так как вблизи значений  $\varphi = 0^0$  и  $\varphi = 90^0$   $tg\varphi$  или  $ctg\varphi$  стремятся к бесконечности [16], что в формулах (2) - (4) может привести к неопределенностям. Для рационального использования шкалы угла  $\varphi$  необходимо согласовать ее с диапазоном измерения устройства, что выполняется соответствующим выбором сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ . Сначала выполним это для шкалы  $C_X$ , пользуясь формулами (2) и (3).

Из формул (2) и векторной диаграммы видно, что всегда  $\varphi_2 > \varphi_1$ , и чем больше разность  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ , тем выше чувствительность измерения как  $C_X$ , так и  $tg\delta$ , а  $\Delta\varphi$  тем больше, чем больше отношение  $m = R_2/R_1$ , которое назовем коэффициентом чувствительности. Представим (3) в виде

$$C_X = \frac{m}{\omega R_1 (1+m)} \cdot \frac{1}{ctg\varphi_1 - ctg\varphi_2}. \quad (5)$$

Значение сопротивления  $R_1$  можно вычислить по первой формуле (2). В табл. 1 представлены значения  $R_X$ , вычисленные по формуле (1) для выбранных диапазонов, откуда видно, что всегда  $R_X \gg X_C = 1/\omega C_X$ . В свою очередь,  $R_1$  должно быть соизмеримо с  $X_C$ , следовательно,  $R_X \gg R_1$ . С учетом этого из (2) получаем упрощенную формулу для определения  $R_1$ :

$$tg\varphi_1 = \omega R_1 C_X. \quad (6)$$

Для выбранной шкалы  $3^0 \leq \varphi \leq 87^0$  угла  $\varphi$  следует  $\varphi_2 \leq 87^0$ , поэтому ограничимся для угла  $\varphi_1$  значением  $\varphi_{1max} = 80^0$ . Следовательно, из (6) получим

$$R_1 = \frac{tg\varphi_{1max}}{\omega C_{Xmax}} = \frac{tg80^0}{2\pi f C_{Xmax}} = \frac{5,671}{2\pi \cdot 1000 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}} \approx 9,0 \text{ кОм}.$$

Таблица 1

Расчетные значения ЭПС конденсатора в зависимости от значений  $C_X$  и  $tg\delta$   
при  $f = 1000$  Гц

$C_X$ , мкФ	$X_C$ , кОм	$R_X$ , кОм, при:					
		$tg\delta = 0,0005$	$tg\delta = 0,001$	$tg\delta = 0,01$	$tg\delta = 0,02$	$tg\delta = 0,04$	$tg\delta = 0,05$
0,001	160	320000	160000	16000	8000	4000	3200
0,002	80	160000	80000	8000	4000	2000	1600
0,004	40	80000	40000	4000	2000	1000	800
0,006	26,66	53333,2	26666	2666,6	1333,3	666,65	533,3
0,008	20	40000	20000	2000	1000	500	400
0,01	16	32000	16000	1600	800	400	320
0,02	8	16000	8000	800	400	200	160
0,04	4	8000	4000	400	200	100	80
0,06	2,66	5333,3	2666,6	266,6	133,3	66,65	53,33
0,08	2	4000	2000	200	100	50	40
0,1	1,6	3200	1600	160	80	40	32

По этому значению  $R_1$  можно определить минимальное значение угла  $\varphi_1$ :

$$tg\varphi_{1min} = \omega R_1 C_{Xmin} = 2\pi \cdot 1000 \cdot 9 \cdot 10^3 \cdot 0,001 \cdot 10^{-6} = 0,0565, \quad \varphi_{1min} = 3^{\circ}14'.$$

Сопротивление  $R_2$  вычисляется исходя из требуемой чувствительности измерения  $\Delta\varphi_E = \varphi_2 - \varphi_1$  для конца шкалы с помощью формулы

$$tg\varphi_{2max} = \omega(R_1 + R_2)C_{Xmax}, \quad (7)$$

получаемой из (2) при условии  $R_X \gg R_1 + R_2$ . Результаты расчетов зависимости  $R_2 = f(\Delta\varphi_E)$  представлены в табл. 2, где приведены также для начала шкалы значения  $tg\varphi_{2B} = \omega(R_1 + R_2)C_{Xmin}$  и  $\Delta\varphi_B = \varphi_{2B} - \varphi_{1min}$ .

Анализ данных табл. 2 показывает, что в рассматриваемом случае целесообразно выбрать то значение  $R_2$ , при котором обеспечивается не только высокая чувствительность (большое значение  $\Delta\varphi$ ), но и примерно одинаковая чувствительность ( $\Delta\varphi_B \approx \Delta\varphi_E$ ) в начале и конце шкалы. Обеспечим это при максимальном значении  $\Delta\varphi_E = 7^{\circ}$ . Из условия  $\Delta\varphi_B = \Delta\varphi_E = 7^{\circ}$  следует  $tg\varphi_{2B} = tg10^{\circ}14' = 0,1805$ , чему соответствует из формулы  $tg\varphi_{2B} = \omega(R_1 + R_2)C_{Xmin}$  значение  $R_1 + R_2 \approx 29,7$  кОм, таким образом, выбираем  $R_2 = 20$  кОм ( $m = 2,22$ ).

Таблица 2

Расчетные значения зависимости  $R_2 = f(\Delta\varphi_E)$  при  $f = 1000$  Гц,

$$R_1 = 9 \text{ кОм}, \varphi_{1\min} = 3^{\circ}14', \varphi_{1\max} = 80^{\circ}$$

$\Delta\varphi_E$	$1^{\circ}$	$2^{\circ}$	$3^{\circ}$	$4^{\circ}$	$5^{\circ}$	$6^{\circ}$	$7^{\circ}$
$\varphi_{2\max}$	$81^{\circ}$	$82^{\circ}$	$83^{\circ}$	$84^{\circ}$	$85^{\circ}$	$86^{\circ}$	$87^{\circ}$
$\text{tg}\varphi_{2\max}$	6,314	7,115	8,144	9,514	11,43	14,30	19,08
$R_1 + R_2, \text{кОм}$	10,10	11,38	13,03	15,22	18,29	22,88	30,53
$R_2, \text{кОм}$	1,10	2,38	4,03	6,22	9,29	13,88	21,53
$\text{tg}\varphi_{2B}$	0,0631	0,0711	0,0814	0,0951	0,1143	0,1430	0,1908
$\varphi_{2B}$	$3^{\circ}37'$	$4^{\circ}4'$	$4^{\circ}40'$	$5^{\circ}26'$	$6^{\circ}31'$	$8^{\circ}8'$	$10^{\circ}48'$
$\Delta\varphi_B$	$23'$	$50'$	$1^{\circ}26'$	$2^{\circ}12'$	$3^{\circ}17'$	$4^{\circ}54'$	$7^{\circ}34'$

По полученным значениям  $R_1$  и  $R_2$  в табл. 3 представлены значения переменных, соответствующие значениям измеряемой емкости, вычисленные по формулам (2) и (5).

Таблица 3

Значения переменных при  $f = 1000$  Гц,  $R_1 = 9$  кОм,

$$R_2 = 20 \text{ кОм}$$

$C_X, \text{мкФ}$	$\text{tg}\varphi_1$	$\text{tg}\varphi_2$	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\Delta\varphi$
0,001	0,0565	0,1821	$3^{\circ}14'$	$10^{\circ}19'$	$7^{\circ}5'$
0,002	0,1130	0,3642	$6^{\circ}28'$	$20^{\circ}1'$	$13^{\circ}33'$
0,003	0,1696	0,5464	$9^{\circ}39'$	$28^{\circ}39'$	$19^{\circ}$
0,004	0,2261	0,7285	$12^{\circ}45'$	$36^{\circ}5'$	$23^{\circ}20'$
0,005	0,2826	0,9106	$15^{\circ}47'$	$42^{\circ}19'$	$26^{\circ}32'$
0,006	0,3391	1,0927	$18^{\circ}44'$	$47^{\circ}32'$	$28^{\circ}48'$
0,007	0,3956	1,2748	$21^{\circ}41'$	$51^{\circ}53'$	$30^{\circ}12'$
0,008	0,4522	1,4569	$24^{\circ}19'$	$55^{\circ}32'$	$31^{\circ}13'$
0,0085	0,4804	1,5480	$25^{\circ}42'$	$57^{\circ}5'$	$31^{\circ}23'$
0,009	0,5087	1,6391	$26^{\circ}58'$	$58^{\circ}37'$	$31^{\circ}39'$
0,0095	0,5369	1,7301	$28^{\circ}14'$	$59^{\circ}58'$	$31^{\circ}44'$
0,01	0,5652	1,8212	$29^{\circ}28'$	$61^{\circ}15'$	$31^{\circ}47'$
0,015	0,8478	2,7318	$40^{\circ}17'$	$69^{\circ}49'$	$29^{\circ}32'$
0,02	1,1304	3,6424	$48^{\circ}30'$	$74^{\circ}34'$	$26^{\circ}4'$
0,05	2,8260	9,1060	$70^{\circ}31'$	$83^{\circ}44'$	$13^{\circ}13'$
0,1	5,6710	14,420	$80^{\circ}$	$86^{\circ}2'$	$6^{\circ}2'$

Анализ данных табл. 3 показывает, что максимальная чувствительность имеет место в середине шкалы - у отметки  $\varphi = 45^\circ$  ( $\Delta\varphi = 31^\circ 47'$ ), и уменьшается по мере удаления от этой отметки, принимая минимальное значение в конце шкалы (рис. 2).

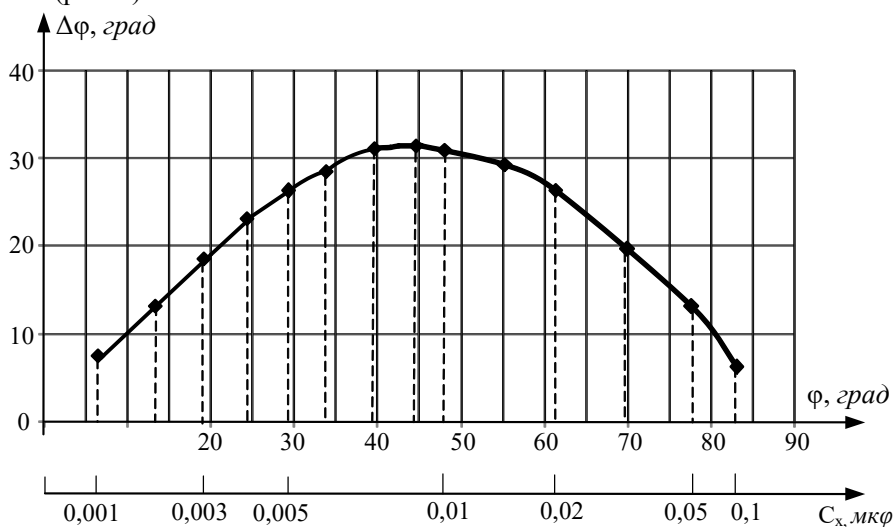


Рис. 2. График зависимости  $\Delta\varphi = f_1(C_x)$

Для согласования с этой же шкалой  $\varphi$  диапазона измерения  $tg\delta$  следует учесть, что с увеличением  $tg\delta$  угол  $\varphi$  уменьшается, что наглядно видно из векторной диаграммы (рис. 1б). Следовательно, значению  $tg\delta = (tg\delta)_{max}$  должна соответствовать отметка шкалы  $\varphi = \varphi_{1min}$ , а значению  $tg\delta = (tg\delta)_{min}$  - отметка шкалы  $\varphi = \varphi_{2max}$ . Анализ показывает, что при этом целесообразно сохранить значения  $R_1, \varphi_{1min}, \varphi_{1max}, \varphi_{2max}$ , полученные для диапазона измерения  $C_x$  (табл. 3). Это позволит использовать всю шкалу  $\varphi$ , а в измерительной цепи изменить только значение сопротивления  $R_2$ . Вычисление требуемого значения  $R_2$  выполняется по формуле (4), принимаемой для начала и конца шкалы  $\varphi$  следующие виды соответственно:

$$(tg\delta)_{max} = ctg(\varphi_{2min}) - \frac{1}{m} \cdot [ctg(\varphi_{1min}) - ctg(\varphi_{2min})], \quad (8)$$

$$(tg\delta)_{min} = ctg(\varphi_{2max}) - \frac{1}{m} \cdot [ctg(\varphi_{1max}) - ctg(\varphi_{2max})]. \quad (9)$$



Из (9) определяем  $m$  :

$$m = \frac{ctg(\varphi_{1max}) - ctg(\varphi_{2max})}{ctg(\varphi_{2max}) - (tg\delta)_{min}} = \frac{ctg80^0 - ctg86^02'}{ctg86^02' - (tg\delta)_{min}} = \frac{0,1763 - 0,0693}{0,0693 - 0,0005} = 1,555.$$

Следовательно,  $R_2 = 1,555R_1 = 1,555 \cdot 9 = 13,997$  кОм. Выбираем  $R_2 = 14$  кОм.

По этому значению  $R_2$  из (8) находим неизвестное значение  $\varphi_{2min}$  :

$$ctg(\varphi_{2min}) = \frac{R_1 \cdot ctg(\varphi_{1min}) + R_2 \cdot (tg\delta)_{max}}{R_1 + R_2} = \frac{R_1 \cdot ctg3^014' + R_2 \cdot (tg\delta)_{max}}{R_1 + R_2} = 6,958$$

или  $\varphi_{2min} = 8^010'$ .

В табл. 4 представлены результаты расчетов зависимости  $\Delta\varphi = f(tg\delta)$  при  $C_X = const$ , вычисленные с помощью формул (2), представленных в виде

$$tg\varphi_1 = \frac{R_1}{(R_1 + R_X)tg\delta}, \quad tg\varphi_2 = \frac{R_1 + R_2}{(R_1 + R_2 + R_X)tg\delta}$$

посредством подстановки в них выражения  $tg\delta$  из (1).

Таблица 4

Расчетные значения зависимости  $\Delta\varphi = f(tg\delta)$   
при  $R_X = 3170$  кОм,  $R_1 = 9$  кОм,  $R_2 = 14$  кОм

$tg\delta$	$tg\varphi_1$	$tg\varphi_2$	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\Delta\varphi$
0,0005	5,671	14,43	80°	86°2'	6°2'
0,001	2,8310	7,200	70°33'	82°6'	11°33'
0,002	1,4155	3,600	54°45'	74°28'	19°43'
0,0025	1,1324	2,880	48°33'	70°51'	22°18'
0,003	0,9436	2,400	43°20'	67°23'	24°31'
0,004	0,7077	1,800	35°17'	60°57'	25°40'
0,0045	0,6291	1,600	32°10'	57°59'	25°49'
0,005	0,5662	1,440	29°31'	55°20'	25°49'
0,0075	0,3775	0,960	20°41'	43°50'	23°09'
0,01	0,2831	0,720	15°48'	35°45'	19°57'
0,015	0,1887	0,480	10°41'	25°39'	14°58'
0,02	0,1415	0,360	8°3'	19°48'	11°45'
0,03	0,0944	0,240	5°24'	13°30'	8°6'
0,04	0,0708	0,180	4°3'	10°12'	6°9'
0,05	0,0565	0,144	3°14'	8°10'	4°56'

В расчетах табл. 4 принято то значение  $R_X$ , при котором выполнено согласование шкалы угла  $\varphi$  с диапазоном измерения  $tg\delta$ , получаемое, например,

из условия  $tg\varphi_{1max} = \frac{R_1}{(R_1 + R_X) \cdot (tg\delta)_{min}}$ , то есть:

$$R_X = \frac{R_1 \cdot [1 - tg\varphi_{1max} \cdot (tg\delta)_{min}]}{tg\varphi_{1max} \cdot (tg\delta)_{min}} = \frac{R_1 \cdot [1 - tg80^\circ \cdot (tg\delta)_{min}]}{tg80^\circ \cdot (tg\delta)_{min}} \approx 3170 \text{ кОм.}$$

Анализ данных табл. 4 показывает, что в этом случае максимальная чувствительность также имеет место в середине шкалы - у отметки  $\varphi = 45^\circ$  ( $\Delta\varphi = 25^\circ 49'$ ), и уменьшается по мере удаления от этой отметки. Минимальная чувствительность в этом случае получается в начале шкалы (рис. 3).

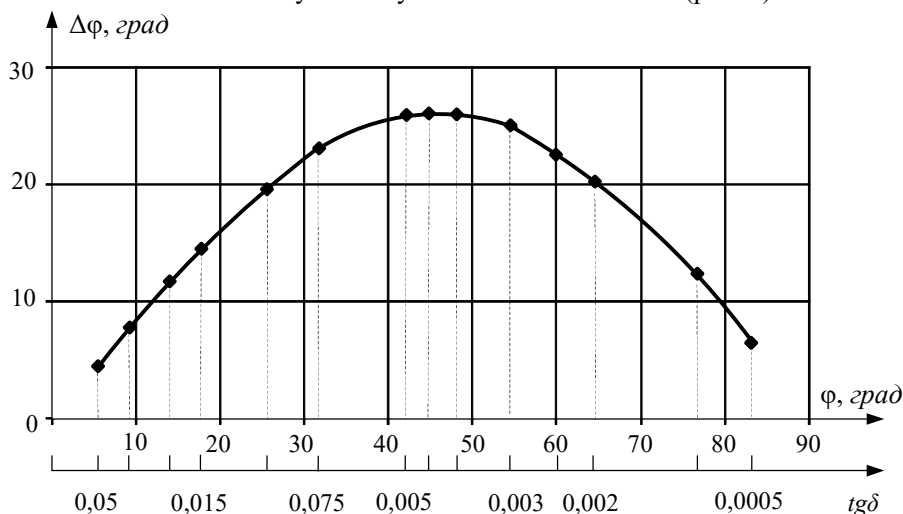


Рис. 3. График зависимости  $\Delta\varphi = f_2(tg\delta)$

**Выводы.** Рассмотренный численный пример подтверждает, что разработанная методика расчета параметров измерительной цепи фазометрического измерителя емкости и тангенса угла потерь конденсаторов является точной, позволяет наилучшим образом согласовать шкалу угла фазового сдвига между выходными напряжениями измерительной цепи с диапазонами изменения измеряемых параметров. Методика является обобщенной, может быть с успехом использована при разработке фазометрических измерителей параметров пассивных электрических двухэлементных двухполюсников любой конфигурации и фазовой характеристики элементов.

## Литература

1. **Валетов В.А., Кузьмин Ю.П., Орлова А.А., Третьяков С.Д.** Технология приборостроения: Учебное пособие, – СПб. СПбГУ ИТМО, 2008. – 336 с.
2. Конденсаторы: виды, устройство, маркировка и параметры конденсаторов // Internet document: [http://www.eti.su/articles/elektrokomponenti/elektrokomponenti\\_1491.html](http://www.eti.su/articles/elektrokomponenti/elektrokomponenti_1491.html).
3. **Иванова Н.Ю., Комарова И.Э., Бондаренко И.Б.** Электрорадиоэлементы. Часть 2. Электрические конденсаторы. - СПб: СПб. университет ИТМО, 2015. - 94 с.
4. **Горячева Г.А., Добромыслов Е.Р.** Конденсаторы: Справочник. - М.: Радио и связь, 1984. – 88 с.
5. Справочник по электрическим конденсаторам / **М.Н. Дьяконов, В.И. Карабанов, В.И. Присняков и др.;** Под общ. ред. И.И. Четверткова и В.Ф. Смирнова. – М.: Радио и связь, 1983. – 576 с.
6. Физические величины: Справочник /**А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский** и др. -М.: Энергоатомиздат, 1991. - 1232 с.
7. Конденсаторы: Справочник / **И.И. Четвертков, М.Н. Дьяконов, В.И. Присняков** и др.; Под ред. И.И. Четверткова, М.Н. Дьяконова. – М.: Радио и связь, 1993. – 392 с.
8. ГОСТ 28885-90. Межгосударственный стандарт. Конденсаторы. Методы измерений и испытаний. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1992. – 20 с.
9. **Татьянченко Л.Н., Сташко В.И.** Контроль изоляции по тангенсу угла диэлектрических потерь: Учебно-методическое пособие. – Барнаул: Изд-во АГТУ им. И.И. Ползунова, 2014. – 13 с.
10. **Топильский В.Б.** Микроэлектронные измерительные преобразователи: Учебное пособие.- М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. - 493 с.
11. **Девкин Ф.М.** Измерение тангенса угла диэлектрических потерь. - Ярославль: РИО Холдинговая компания ЭМЗ, 2008. – 100 с.
12. US Patent № 6,703,847. Determining the dielectric properties of wood / **L. Venter, J. Viljoen.**- 2004.
13. US Patent 6,708,555. Dielectric wood moisture meter / **W.F. Lyons, R. Lessard.**– 2004.
14. **Мамиконян Б.М., Мамиконян Х.Б.** Измерение тангенса угла диэлектрических потерь // Изв. НАН РА и НПУА. Сер. ТН. – 2015. - Том 68, №3. - С. 333-345.
15. **Мамиконян Б.М.** Измерение параметров пассивных электрических двухполюсников фазовым методом // Вестник НПУА: Электротехника, энергетика.- 2017. - №1. – С. 67-76.
16. Таблица Брадиса – ТАНГЕНСЫ И КОТАНГЕНСЫ / Internet document: <http://infotables.ru/matematika/35-tablitsy-bradisa/57-tablitsa-bradisa-tangensy-i-kotangensy>.

*Поступила в редакцию 22.11.2017.  
Принята к опубликованию 13.12.2017.*

**ԿՈՆԴԵՆՍԱՏՈՐՆԵՐԻ ՈՒՆԱԿՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԿՈՐՈՒՍՏՆԵՐԻ ԱՆԿՅԱՆ ՏԱՆԳԵՆՍԻ  
ՖԱԶԱՄԵՏՐԱԿԱՆ ՉԱՓԻՉԻ ՉԱՓՈՂԱԿԱՆ ՇՂԹԱՅԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿԻ  
ՄԵԹՈԴԻԿԱ**

**Բ.Մ. Մամիկոնյան, Դ.Ա. Նիկողոսյան**

Նկարագրված է ցածր լարման կոնդենսատորների էլեկտրական պարամետրերի չափման սարք, որը հիմնված է ունակության և կորուստների անկյան տանգենսի անջատ որոշման ֆազամետրական մեթոդի վրա: Ներկայացված են սարքի սկզբունքային էլեկտրական սխեման, չափողական շղթայի հոսանքների ու լարումների վեկտորական դիագրամը: Սարքի տարբերակիչ առանձնահատկությունն այն է, որ դրանում չափվող պարամետրերի վերաբերյալ տեղեկություն կրողը ոչ թե հոսանքը կամ լարումն են, այլ չափողական շղթայի երկու ելքային սինուսոիդական լարումների միջև ֆազային շեղման անկյունը: Դա ապահովում է չափման արդյունքի բարձր աղմկապաշտպանվածություն, բացի դրանից, ֆազային շեղման անկյունը կարելի է չափել բարձր ճշգրտությամբ՝ դիսկրետ հաշվանքի մեթոդով: Սարքում իրականացված է կառուցվածքային-ալգորիթմական մեթոդը՝ չափման կապուղու ժամանակային բաժանումով, ստացվել են չափվող պարամետրերի անջատ որոշման ալգորիթմները: Կատարված է չափողական շղթայի տարրերի պարամետրերի հաշվարկի մեթոդիկայի մշակումը: Հաշվարկի արդյունքում ապահովվում են հետազոտվող կոնդենսատորի ունակության և տանգենս դելտայի չափման պահանջվող տիրույթները: Հաշվարկի մեթոդիկան ուղեկցվում է թվային օրինակի դիտարկումով՝ որոշակի չափման տիրույթների համար: Հետազոտվել է  $\Delta\varphi = f_1(C_x)$  և  $\Delta\varphi = f_2(tg\delta)$  կերպափոխումների զգայնությունը, ցույց է տրվել, որ առավելագույն զգայնությունն ստացվում է սանդղակի մեջտեղում՝  $\varphi = 45^\circ$  ցուցմունքին մոտ, և փոքրանում է այդ ցուցմունքից հեռանալիս՝ ընդունելով նվազագույն արժեքները սանդղակի սկզբում և վերջում: Մշակված սարքը կարող է օգտագործվել նաև ցանկացած փոխդասավորությամբ պասսիվ էլեկտրական երկտարր երկբևեռանիների պարամետրերի չափման համար՝ ապահովելով դրանց անջատ որոշումը:

**Առանցքային բառեր.** կոնդենսատոր, պարամետր, չափում, ֆազ, չափողական շղթա, զգայնություն, հաշվարկի մեթոդիկա:

## A METHOD FOR CALCULATING THE PARAMETERS OF THE MEASURING CIRCUIT OF THE PHASOMETRIC METER OF THE CAPACITY AND THE TANGENT LOSS ANGLE OF CAPACITORS

**B.M. Mamikonyan, D.S. Nikoghosyan**

A device for measuring the electrical parameters of low-voltage capacitors based on the phasometric method of separate determination of the capacitance and the tangent loss angle is described. The basic electrical circuit of the device, as well as the vector diagram of currents and voltages of the measuring circuit are presented. A distinctive feature of the device is that, in it, the carrier of information about the measured parameters is not the current or voltage, but the angle of phase shift between the two output sinusoidal voltages of the measuring circuit which can be measured with high accuracy by the discrete counting method. In the device, a structural-algorithmic method with a temporal separation of the measurement channel is implemented, algorithms for the separate determination of the measured parameters are obtained. The article is mainly devoted to the development of a method for calculating the parameters of the elements of the measuring circuit. As a result of calculation, the required ranges of capacitance and tangent delta of the capacitors under investigation are provided. The calculation method is accompanied by a numerical example applied to specific measurement ranges. The sensitivity of the conversion  $\Delta\varphi = f_1(C_X)$  and  $\Delta\varphi = f_2(tg\delta)$  is investigated, it is shown that the maximum sensitivity is obtained in the middle of the scale at the point  $\varphi = 45^\circ$ , and it decreases with the distance from this point, taking the minimum values at the beginning and the end of the scale. The designed device can also be used to measure the parameters of passive electrical two-terminal two-ports of any configuration, providing their separate determination.

**Keywords:** capacitor, parameter, measurement, phase, measuring circuit, sensitivity, methodology of calculation.