

**Р.Р. ВАРДАНЯН, А.Р. ХАРАКЕШИШЯН, М.Г. ТРАВАДЖЯН**

**ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНЦЕНТРАТОРНОЙ  
ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКОЙ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ**

Концентрация солнечных лучей позволяет преобразовать солнечную энергию в электрическую с повышенной эффективностью. В настоящее время используются различные типы систем концентраторов Солнца. В данной работе исследуется фотоэлектрический концентратор на основе линзы Френеля с системой водяного охлаждения термосифонного типа. Измеряются температуры в разных точках системы охлаждения. Показано, что предложенный тип гибридной системы может быть успешно использован.

**Ключевые слова:** концентрирующий, солнечный, фотоэлектрический, тепловой, нагрев, вода.

УДК 621.317.733

**Б.М. МАМИКОНЯН, Г.А. АВЕТИСЯН**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ  
ПАРАМЕТРОВ НИЗКОВОЛЬТНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ В ФАЗОВЫЙ  
СИГНАЛ  
(Гюмри)**

Рассмотрена измерительная цепь (ИЦ), предназначенная для преобразования в фазовый сигнал параметров низковольтных конденсаторов с малыми диэлектрическими потерями. Изложены методики расчета параметров элементов ИЦ и исследования чувствительности преобразования.

**Ключевые слова:** конденсатор, емкость, тангенс-дельта, фазовый сигнал, чувствительность преобразования.

**Введение.** Низковольтные конденсаторы, предназначенные для применения в радиоэлектронной аппаратуре, составляют около 25% от всех элементов схем [1], поэтому исследования, посвященные методам и средствам измерения их характеристик, продолжают оставаться актуальными.

**Объект исследования.** Основными параметрами конденсаторов являются номинальная емкость  $C_x$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $tg\delta$ . Для широко используемых конденсаторов  $tg\delta$  находится в пределах от 0,0005 (для фторопластовых) до 0,035 (для керамических) [2]. 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  $5\text{ В}$  [3]. Основные методы измерения  $C_x$  и  $tg\delta$  описаны в [4], сравнительно новым является фазовый метод, в котором носителем информации об измеряемых параметрах является не ток или напряжение, а угол фазового сдвига между двумя выходными синусоидальными напряжениями ИЦ.

**Методы исследования и результаты.** Для измерения  $C_x$  и  $tg\delta$  эквивалентную схему конденсатора представляют как идеальный конденсатор емкостью  $C_x$  с последовательно включенным активным сопротивлением  $R_x$  (последовательная схема) или как идеальный конденсатор с параллельно включенным активным сопротивлением (параллельная схема), при этом последовательная схема предпочтительна при малых потерях, параллельная – при больших. В настоящей работе описана методика анализа чувствительности преобразования в фазовый сигнал параметров последовательной эквивалентной схемы низковольтных конденсаторов с малыми диэлектрическими потерями. Выбраны диапазоны измерения:  $C_x = 0,05 \dots 1,0 \text{ мкФ}$ ,  $tg\delta = 0,0005 \dots 0,01$ . За основу выбрана схема ИЦ, в которой опорное напряжение формируется на резисторе  $R_N$  цепи обратной связи операционного усилителя (ОУ), а последовательно с конденсатором включен образцовый резистор  $R_2$  (рис. 1). В этой схеме параметры  $R_x$  и  $C_x$  конденсатора преобразуются в угол фазового сдвига  $\varphi$  между выходными напряжениями  $U_N$  и  $U_S$ . Эти напряжения поступают на аналоговые входы программируемого микроконтроллера (МК) (марка - PIC32MX695F512H), имеющего два входных встроенных аналоговых компаратора с устройствами переключения по входам (один из них используется для переключения резистора  $R_2$ ). В процессе измерения МК управляет положением переключателя, измеряет методом дискретного счета значения  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  угла  $\varphi$  в двух положениях 1 и 2 переключателя соответственно и по заданным алгоритмам вычисляет параметры конденсатора.

Для вывода формул преобразования исходим из следующих допущений. Поскольку ОУ имеет очень большой коэффициент усиления и высокое входное сопротивление (например, в опытном образце использован прецизионный ОУ типа ICL7650, коэффициент усиления которого  $A = 10^6$ , входное сопротивление  $R_{IN} = 10^{12} \text{ Ом}$ ), то практически инвертирующий вход ОУ виртуально “заземлен”, а измерительный ток  $\dot{I}$  целиком течет через цепочку обратной связи. В связи с этим выходные напряжения  $\dot{U}_N$  и  $\dot{U}_S$  относительно потенциала “земли” определяются выражениями

$$\dot{U}_N = \dot{I}R_N, \dot{U}_{S1} = \dot{U}_X = \dot{I}Z_X, \dot{U}_{S2} = \dot{I}(R_2 + Z_X),$$

$$Z_X = R_X - j/\omega C_X = (\omega R_X C_X - j)/\omega C_X,$$

где  $\dot{U}_{S1}$  и  $\dot{U}_{S2}$  - напряжение  $\dot{U}_S$  в положениях 1 и 2 переключателя соответственно.

В этой схеме  $\text{tg} \delta = \omega R_X C_X$ . Для инвариантного преобразования параметров  $R_X$  и  $C_X$  необходимо угол  $\varphi$  измерять между напряжением  $\dot{U}_N$  и напряжением  $\dot{U}_S$ :  $\varphi = \psi_{U_N} - \psi_{U_S}$ , т.е.

$$\text{tg} \varphi_1 = \frac{I_m(\dot{U}_N / \dot{U}_{S1})}{\text{Re}(\dot{U}_N / \dot{U}_{S1})} = 1/\omega R_X C_X, \quad (1)$$

$$\text{tg} \varphi_2 = 1/\omega(R_2 + R_X)C_X. \quad (2)$$

Преобразованиями (1) и (2) получаем

$$R_X = \frac{R_2 \cdot \text{tg} \varphi_2}{\text{tg} \varphi_1 - \text{tg} \varphi_2}, \quad (3)$$

$$C_X = \frac{\text{ctg} \varphi_2 - \text{ctg} \varphi_1}{\omega R_2}, \quad (4)$$

$$\text{tg} \delta = 1/\text{tg} \varphi_1. \quad (5)$$

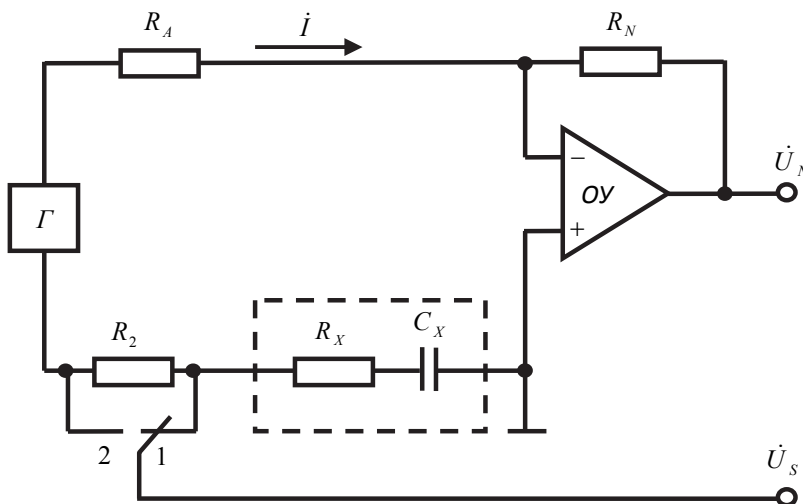


Рис. 1. Функциональная схема базовой ИЦ

В (3) отсутствует  $C_X$ , а в (4) -  $R_X$ , т.е. обеспечивается раздельное, не зависимое друг от друга (инвариантное) преобразование параметров  $R_X$  и  $C_X$ , при этом результат преобразования не зависит от измерительного тока, погрешностей ОУ и точности резистора  $R_N$ . Необходимо измерять 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 в МК с высокой точностью методом дискретного счета.

Чувствительность преобразования параметров конденсатора в фазовый сигнал определяется разностью  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ . Теоретически, в зависимости от параметров исследуемого конденсатора, углы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  могут принимать любые значения в диапазоне  $0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ . Однако, учитывая особенности тангенсных и котангенсных функций, с целью обеспечения приемлемой чувствительности преобразования, целесообразно, чтобы угол  $\varphi$  не приближался к краям этого диапазона, так как вблизи углов  $\varphi = 0^\circ$  и  $\varphi = 90^\circ$  значения  $tg\varphi$  или  $ctg\varphi$  стремятся к бесконечности, что в формулах (3) - (5) может привести к неопределенностям и потере чувствительности. Поэтому необходимо ограничить диапазон угла  $\varphi$  некоторым участком в середине шкалы  $\varphi = \varphi_H \dots \varphi_K$ , где начало шкалы -  $\varphi_H > 0$ , а конец шкалы -  $\varphi_K < 90^\circ$ . Поскольку в рассматриваемой схеме  $\varphi_1 > \varphi_2$ , то должно быть  $\varphi_H = \varphi_{2\min}$ ,  $\varphi_K = \varphi_{1\max}$ . В разработке выбрано  $\varphi = 10^\circ \dots 80^\circ$ , при которых  $tg\varphi_{2\min} = tg10^\circ = 0,176$ ,  $tg\varphi_{1\max} = tg80^\circ = 5,67$ . Из (5) следует, что  $tg\varphi_1 = 1/tg\delta$ . Для выбранного диапазона  $tg\delta = 0,0005 \dots 0,01$  получаем  $tg\varphi_{1\max} = 1/tg\delta_{\min} = 2000$ ,  $tg\varphi_{2\min} = 1/tg\delta_{\max} = 100$ , следовательно, рабочий диапазон угла  $\varphi$  получается  $\varphi = 89,427 \dots 89,971$ , где чувствительность  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  стремится к нулю. Заметим, что выбранный нами участок шкалы  $\varphi = 10^\circ \dots 80^\circ$  соответствует только диапазону измерения  $tg\delta = 0,176 \dots 5,67$ , а конденсаторов с такими данными не бывает. Та же ситуация имеет место с диапазоном измерения емкости  $C_X$ , поскольку  $tg\delta$  прямо пропорционален  $C_X$ .

Причиной является отсутствие в схеме рис. 1 элемента, выбором параметра которого можно было установить значение  $\varphi_K$ . В связи с этим в схеме используемой ИЦ предусмотрен дополнительный резистор  $R_1$  (рис. 2). Для этой схемы

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = 1 / \omega (R_1 + R_x) C_x, \quad (6)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = 1 / \omega (R_1 + R_2 + R_x) C_x. \quad (7)$$

В результате выбором сопротивления  $R_1$  устанавливается необходимое значение  $\varphi_k$  в формуле (6), а выбором сопротивления  $R_2$  - значение  $\varphi_H$  в формуле (7). В схеме рис. 2 формулам (3) - (5) соответствуют следующие формулы, получаемые преобразованием (6) и (7):

$$R_x = \frac{R_2 \operatorname{tg} \varphi_1 - R_1 (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)}{\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2}, \quad C_x = \frac{\operatorname{ctg} \varphi_2 - \operatorname{ctg} \varphi_1}{\omega R_2}, \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{(1+m) \operatorname{tg} \varphi_2 - \operatorname{tg} \varphi_1}{m \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi_2},$$

где отношение  $m = R_2 / R_1$  выполняет в данной схеме роль *коэффициента чувствительности* преобразования.

Учитывая выбранные диапазоны измерения и шкалу угла  $\varphi$ , с помощью формул (6) и (7) найдем значения сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ :

$$\operatorname{tg} \varphi_{1 \max} = \operatorname{tg} 80^\circ = 5,67 = \frac{1}{\omega (R_1 + R_x) C_{x \min}} = \frac{1}{6280 \cdot (R_1 + R_x) \cdot 0,05 \cdot 10^{-6}},$$

откуда получаем  $R_1 + R_x = 561,68 \text{ Ом}$ ;

$$\operatorname{tg} \varphi_{2 \min} = \operatorname{tg} 10^\circ = 0,176 = \frac{1}{\omega (R_1 + R_2 + R_x) C_{x \max}} = \frac{1}{6280 \cdot (R_1 + R_2 + R_x) \cdot 1,0 \cdot 10^{-6}},$$

откуда  $R_1 + R_2 + R_x = 904,748 \text{ Ом}$ , значит,  $R_2 = 904,748 - (R_1 + R_x) \approx 343 \text{ Ом}$ .

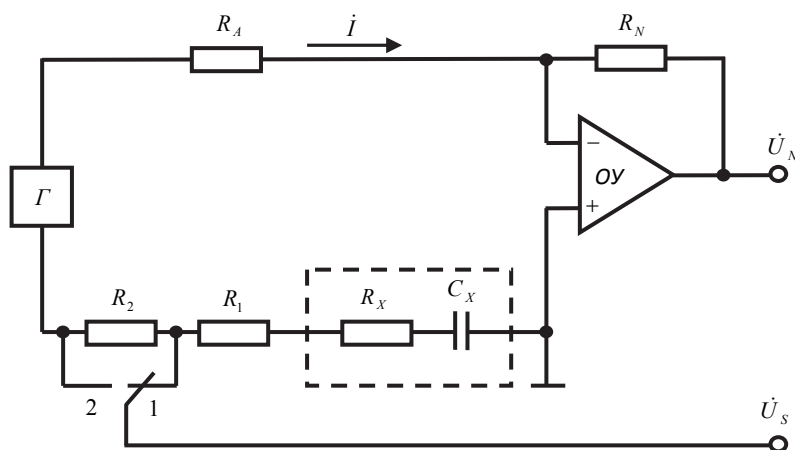


Рис. 2. Функциональная схема разработанной ИЦ

Пользуясь предельными значениями  $tg\delta$ , находим сопротивление  $R_X$ :

$$tg\delta_{\min} = \omega R_X C_{X\min}, R_X = \frac{tg\delta_{\min}}{\omega C_{X\min}} = 1,59 \text{ Ом}; \text{ это же значение } R_X \text{ получается}$$

по формуле  $tg\delta_{\max} = \omega R_X C_{X\max}$ . Следовательно,  $R_1 = 561,68 - 1,59 \approx 560,1 \text{ Ом}$ .

При этих значениях параметров элементов ИЦ выполнен расчет значений переменных и чувствительности преобразования  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$  вдоль шкалы угла  $\varphi$  (см. табл.). По результатам расчетов построен график зависимости  $\Delta\varphi = f(\varphi)$  (рис. 3), откуда видно, что чувствительность преобразования параметров конденсатора в фазовый сигнал максимальна в середине шкалы угла  $\varphi$  при значении  $\varphi = 45^\circ$ , где она примерно в 2,5 раза больше, чем у крайних отметок шкалы  $\varphi = 10^\circ$  и  $\varphi = 80^\circ$ . Поэтому, если позволяют диапазоны изменений параметров конденсатора, можно сузить шкалу угла  $\varphi$  относительно отметки  $\varphi = 45^\circ$  с целью повышения чувствительности преобразования.

Таблица

Результаты расчета чувствительности преобразования  
 $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  при  $f = 1000 \text{ Гц}$ ,  $R_1 + R_X = 561,68 \text{ Ом}$ .  $R_2 \approx 343 \text{ Ом}$ ,  
 $\varphi = (\varphi_1 + \varphi_2)/2$

$C_X$ , мкФ	$tg\delta$	$tg\varphi_1$	$tg\varphi_2$	$\varphi_1$ , град.	$\varphi_2$ , град.	$\varphi$ , град.	$\Delta\varphi$ , град.
0,05	0,0005	5,67	3,52	80,0	74,14	77,06	5,86
0,1	0,001	2,84	1,76	70,57	60,39	65,48	10,18
0,15	0,0015	1,89	1,17	62,12	49,56	55,84	12,56
0,2	0,002	1,42	0,88	54,80	41,35	48,08	13,45
0,25	0,0025	1,13	0,70	48,59	35,15	41,87	13,44
0,3	0,003	0,95	0,59	43,38	30,39	36,88	12,99
0,4	0,004	0,71	0,44	35,30	23,78	29,53	11,55
0,5	0,005	0,57	0,35	29,55	19,39	24,47	10,16
0,6	0,006	0,47	0,29	25,29	16,35	20,82	8,94
0,7	0,007	0,41	0,25	22,05	14,11	18,08	7,94
0,8	0,008	0,35	0,22	19,51	12,41	15,96	7,10
0,9	0,009	0,32	0,20	17,48	11,06	14,27	6,42
1,0	0,01	0,28	0,18	15,83	10,00	12,92	5,85

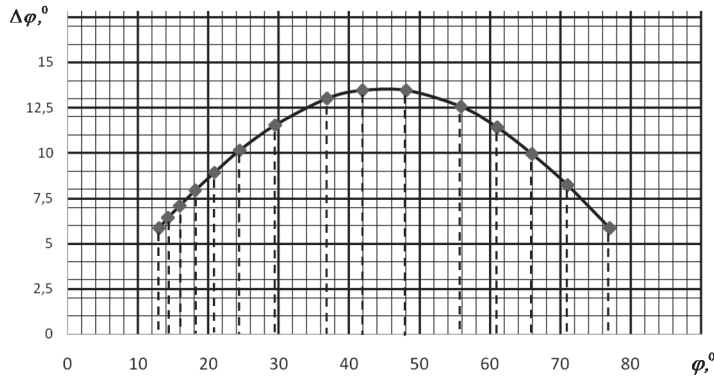


Рис. 3. Кривая изменения чувствительности преобразования параметров конденсатора в фазовый сигнал вдоль шкалы угла  $\varphi$

**Выводы.** Разработанная схема ИЦ позволяет реализовать инвариантное преобразование параметров конденсаторов с малыми диэлектрическими потерями в фазовый сигнал. Изложенные методики расчета параметров элементов ИЦ и анализа чувствительности преобразования позволяют производить оптимальное проектирование измерителя параметров конденсаторов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валетов В.А., Кузьмин Ю.П., Орлова А.А., Третьяков С.Д. Технология приборостроения: Учебное пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. – 336 с.
2. Иванова Н.Ю., Комарова И.Э., Бондаренко И.Б. Электрорадиоэлементы. Часть 2. Электрические конденсаторы. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. - 94 с.
3. ГОСТ 28885-90. Межгосударственный стандарт. Конденсаторы. Методы измерений и испытаний. – М.: ИПК “Изд-во стандартов”, 1992. – 20 с.
4. Мамиконян Б.М., Мамиконян Х.Б. Инвариантное преобразование электрических параметров пассивных двухэлементных двухполюсников // Вестник НПУА: Электротехника, энергетика. – 2020. - №2. – С. 91-100.

### Բ.Մ. ՄԱՄԻԿՈՆՅԱՆ, Հ.Ա. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ

#### ՑԱԾՐԱՎՈՒՆՏ ԿՈՆԴԵՆՍԱՏՈՐՆԵՐԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԸ ՓՈՒԼԱՅԻՆ ԱՉԴԱՆՇԱՆԻ ԿԵՐՊԱՓՈՒՄԱՆ ԶԳԱՅՆՈՒԹՅԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Դիտարկված է չափիչ շղթա (ՉՇ), որը նախատեսված է փոքր դիէլեկտրական կորուստներով ցածրավոլտ կոնդենսատորների պարամետրերը փուլային ազդանշանի կերպափոխման համար: Շարադրված են ՉՇ-ի տարրերի պարամետրերի հաշվարկի և կերպափոխման զգայնության հետազոտման մեթոդակարգերը:

**Առանցքային բաներ.** կոնդենսատոր, ունակություն, տանգենս-դելտա, փուլային ազդանշան, կերպափոխման զգայնություն:

**B.M. MAMIKONYAN, H.A. AVETISYAN**

**INVESTIGATING THE SENSITIVITY OF THE CONVERSION  
PARAMETER OF LOW-VOLTAGE CAPACITORS INTO A PHASE  
SIGNAL**

A measuring circuit (MC) designed to convert the parameters of low-voltage capacitors with low dielectric losses into a phase signal is considered. The methods for calculating the parameters of MC elements and studying the sensitivity of the conversion are described.

*Keywords:* capacitor, capacitance, delta-tangent, phase signal, conversion sensitivity.

УДК 621.317.334.2

**Б.М. МАМИКОНЯН, С.А. КАЗАРЯН**

**ИНВАРИАНТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АКТИВНО-  
ИНДУКТИВНОГО ДВУХПОЛЮСНИКА ФАЗОВЫМ МЕТОДОМ  
(Гюмри)**

Исследована измерительная цепь (ИЦ) микроконтроллерного измерителя, предназначенного для инвариантного измерения параметров активно-индуктивного двухполюсника. Изложена методика расчета параметров элементов ИЦ и анализа чувствительности преобразования измеряемых параметров в фазовый сигнал.

*Ключевые слова:* двухполюсник, измерение, фазовый метод, чувствительность преобразования.

**Введение.** В электрических цепях переменного тока широко применяются активно-индуктивные двухполюсники (АИД) как с последовательным соединением  $R - L$ , так и с параллельным. Примером подобных АИД являются индуктивные измерительные преобразователи (ИП), в которых информативным параметром может быть как индуктивность  $L$  катушки (в классических ИП), так и активное сопротивление  $R$  катушки (в вихретоковых ИП). Особенностью этих АИД является то, что они представляют собой комплексный двухполюсник, специфика измерения параметров которого состоит в обеспечении раздельного отсчета по каждому из параметров, т.е. в обеспечении взаимной инвариантности результатов измерения [1].

**Объект исследования.** Объектом настоящего исследования является микроконтроллерный измеритель параметров АИД с параллельной схемой соединения  $R$  и  $L$ , для обеспечения инвариантности измерения которых использован фазовый метод [2]. Анализ различных схем измерительных цепей (ИЦ), применяемых при реализации фазового метода [3], показывает, что в