

Б.М. МАМИКОНЯН, Г.А. АВETИСЯН

**ИНВАРИАНТНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ
НИЗКОВОЛЬТНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ С МАЛЫМИ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПОТЕРЯМИ В ФАЗОВЫЙ СИГНАЛ
(Гюмри)**

Описана измерительная цепь (ИЦ), предназначенная для отдельного преобразования емкости и тангенса дельта низковольтных конденсаторов с малыми диэлектрическими потерями в фазовый сигнал. Изложена методика расчета параметров элементов ИЦ при заданных диапазонах измерения, оценена чувствительность преобразования.

Ключевые слова: конденсатор, емкость, тангенс дельта, измерение, 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 и контроля их характеристик, были и остаются актуальными. Основными параметрами конденсаторов являются номинальная емкость C_x и тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$, который зависит от типа диэлектрика и его качества. 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 В [3]. Основные методы измерения C_x и $tg\delta$ описаны в [3]. Сравнительно новым является фазовый метод, отличительной особенностью которого является то, что в нем носителем информации об измеряемых параметрах является не ток или напряжение, а угол фазового сдвига между двумя выходными синусоидальными напряжениями ИЦ. Это обеспечивает высокую помехозащищенность результата измерения, кроме того, угол фазового сдвига можно измерить с высокой точностью методом дискретного счета.

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 с параллельно

включенным активным сопротивлением (параллельная схема), при этом последовательная схема предпочтительна при малых потерях, параллельная – при больших. Целью настоящей работы является инвариантное, в частности – раздельное преобразование параметров C_X и R_X последовательной эквивалентной схемы конденсатора в фазовый сигнал.

Объект исследования. Существующие схемы ИЦ, применяемые для инвариантного преобразования параметров C_X и R_X в фазовый сигнал, предназначены только для параллельной эквивалентной схемы конденсатора и непригодны для последовательной [4, 5]. Этим обусловлена разработка схемы ИЦ, в которой использован операционный усилитель (ОУ) ОУ1, включенный по схеме инвертирующего усилителя (см. рис.).

Во входной цепи ОУ последовательно с исследуемым конденсатором соединены образцовые резисторы R_1 и R_2 , в цепи обратной связи – опорный резистор R_N . ИЦ питается током генератора синусоидального напряжения (непосредственно или через токоограничивающее устройство R_A). Выходными сигналами ИЦ являются два напряжения относительно общей точки: напряжение U_N опорного резистора R_N и напряжение U_S общего контакта переключателя, при этом информативным параметром является угол φ фазового сдвига между этими напряжениями. Следует отметить, что напряжение смещения ОУ, его дрейф и входные токи не влияют на точность преобразования параметров конденсатора, поскольку, в отличие от выходных напряжений, угол φ от них не зависит.

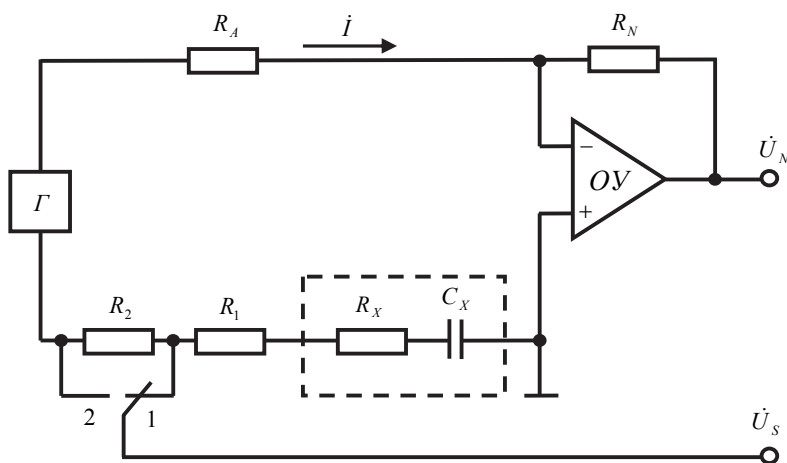


Рис. Функциональная схема ИЦ инвариантного преобразования параметров конденсаторов с малыми диэлектрическими потерями в фазовый сигнал

Методика и результаты исследования. Для определения функций преобразования используем выражения напряжений:

$$\dot{U}_N = \dot{I}R_N, \dot{U}_{S1} = \dot{I}(R_1 + R_X - jX_C),$$

где \dot{U}_{S1} - напряжение \dot{U}_S в положении 1 переключателя, $X_C = 1/\omega C_X$,

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_1 &= \frac{I_m (\dot{U}_N / \dot{U}_{S1})}{\operatorname{Re}(\dot{U}_N / \dot{U}_{S1})}, \frac{\dot{U}_N}{\dot{U}_{S1}} = \frac{R_N}{R_1 + R_X - jX_C} = \frac{R_N (R_1 + R_X + jX_C)}{(R_1 + R_X)^2 + X_C^2}, \\ \operatorname{tg} \varphi_1 &= \frac{X_C}{R_1 + R_X}. \end{aligned} \quad (1)$$

Аналогично получаем

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{X_C}{R_1 + R_2 + R_X}. \quad (2)$$

Путем несложных преобразований (1) и (2) находим

$$C_X = \frac{\operatorname{ctg} \varphi_2 - \operatorname{ctg} \varphi_1}{\omega R_2}, \quad (3)$$

$$R_X = \frac{(R_1 + R_2) \operatorname{ctg} \varphi_1 - R_1 \operatorname{ctg} \varphi_2}{\operatorname{ctg} \varphi_2 - \operatorname{ctg} \varphi_1}. \quad (4)$$

В (3) не фигурирует R_X , а в (4) - C_X , то есть обеспечивается их раздельное преобразование в фазовый сигнал.

В последовательной эквивалентной схеме конденсатора $\operatorname{tg} \delta = \omega R_X C_X$. С учетом (3) и (4) получаем

$$\operatorname{tg} \delta = [(1 + m) \operatorname{ctg} \varphi_1 - \operatorname{ctg} \varphi_2] / m, \quad (5)$$

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

Таким образом, для определения параметров конденсатора необходимо измерять только углы φ_1 и φ_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 опытном образце разработанного устройства синусоидальные напряжения u_N и u_S через повторители напряжения (буферы) поступают на аналоговые входы программируемого микроконтроллера (МК), имеющего в своем составе два входных компаратора с устройствами переключения по входам (один из них используется для переключения резистора R_1). опорное напряжение для обоих компараторов формируется в МК. Это же напряжение поступает на положительный вход усилителя опорной частоты. Тем самым сигнал опорной частоты смещается на величину опорного напряжения. Благодаря этому срабатывание компараторов осуществляется в нулевой точке синусоидального сигнала. По сигналу прерывания от первого компаратора запускается счетчик внутри МК, и начинается счет от тактового генератора. По прерыванию от срабатывания второго компаратора счетчик останавливается. В результате угол φ преобразуется в пропорциональный интервал времени, который заполняется тактовыми импульсами. Таким образом, МК осуществляет управление процессом измерения, измеряет углы φ_1 и φ_2 и по алгоритмам (3) - (5) вычисляет значения параметров конденсатора. В разработанном образце использован программируемый МК типа PIC32MX695F512H. С целью повышения точности тактового сигнала МК в устройстве предусмотрен внешний кварцевый резонатор с частотой 8 МГц. В МК эта частота умножается на 10, получается 80 МГц, на которой работают МК, ядро, счетчики и все периферийные устройства. Это та максимальная частота, на которой может работать данный МК.

Расчет параметров элементов ИЦ. Теоретически, в зависимости от значений C_X и $tg\delta$, угол φ может находиться в любой точке 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 φ 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. В рассматриваемом случае целесообразно, чтобы угол φ не выходил за пределы $15^\circ \leq \varphi \leq 75^\circ$. Для рационального использования шкалы угла φ необходимо согласовать ее с диапазоном значений параметров катушки, что выполняется соответствующим выбором сопротивлений R_1 и R_2 . Сначала выполним это для шкалы C_X .

Исходя из приведенных выше возможных значений параметров конденсаторов, в разработанном устройстве выбраны следующие диапазоны измерения и частота генератора: $C_X = 0,001...0,1$ мкФ, $tg\delta = 0,0005...0,05$, $f = 1000$ Гц.

Из (1) и (2) видно, что всегда $\varphi_1 > \varphi_2$, и чем больше разность $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, тем выше чувствительность преобразования как C_X , так и $tg\delta$, а $\Delta\varphi$ тем больше, чем больше отношение $m = R_2/R_1$. Учитывая выбранные диапазоны измерения и шкалу угла φ , имеем следующие зависимости:

$$\bullet \quad tg\varphi_{1\max} = \frac{1}{\omega C_{X\max} (R_1 + R_X)}, \text{ где } tg\varphi_{1\max} = tg75^0 = 3,732, \text{ и получаем}$$

$$R_1 + R_X = 426,676 \text{ Ом};$$

$$\bullet \quad tg\varphi_{2\min} = \frac{1}{\omega C_{X\min} (R_1 + R_X + R_2)}, \text{ где } tg\varphi_{2\min} = tg15^0 = 0,268, \text{ и полу-}$$

чаем

$$R_1 + R_X + R_2 = 594,177 \text{ кОм},$$

следовательно, $R_2 = (594,177 - 0,426676) = 593,75 \text{ кОм}$.

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

$$tg\delta_{\min} = \omega R_X C_{X\min}, \quad R_X = \frac{tg\delta_{\min}}{\omega C_{X\min}} = 79,6 \text{ Ом}; \text{ это же значение } R_X \text{ получается}$$

по формуле $tg\delta_{\max} = \omega R_X C_{X\max}$. Следовательно, $R_1 = 426,676 - 79,6 = 347 \text{ Ом}$.

Таким образом, значением сопротивления R_1 выбирается конечная отметка шкалы $\varphi = \varphi_{1\max} = 75^0$, соответствующая значению $C_X = C_{X\max} = 0,1 \text{ мкФ}$, а значением сопротивления R_2 - начальная отметка шкалы $\varphi = \varphi_{2\min} = 15^0$, соответствующая значению $C_X = C_{X\min} = 0,001 \text{ мкФ}$.

Шкала C_X будет соответствовать также диапазону измерения $tg\delta$, поскольку $tg\delta$ прямо пропорционален C_X . Проверим это, пользуясь формулами (1) и (2):

$$tg\varphi_{1\max} = \frac{1}{\omega C_{X\max} (R_1 + R_X)} = \frac{1}{\omega R_1 C_{X\max} + tg\delta_{\max}},$$

откуда

$$tg\delta_{\max} = \frac{1 - \omega R_1 C_{X\max} tg\varphi_{1\max}}{tg\varphi_{1\max}} = \frac{1 - 6,28 \cdot 10^3 \cdot 347 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 3,732}{3,732} = 0,05;$$

$$tg\varphi_{2\min} = \frac{1}{\omega C_{X\min} (R_1 + R_2 + R_X)} = \frac{1}{\omega (R_1 + R_2) C_{X\min} + tg\delta_{\min}},$$

откуда

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta_{\min} &= \frac{1 - \omega(R_1 + R_2)C_{X \min} \operatorname{tg} \varphi_{2 \min}}{\operatorname{tg} \varphi_{2 \min}} = \\ &= \frac{1 - 6,28 \cdot 10^3 \cdot (0,347 + 593,75) \cdot 10^3 \cdot 0,001 \cdot 10^{-6} \cdot 0,268}{0,268} \approx 0,0005. \end{aligned}$$

Таким образом, рассчитанная шкала соответствует диапазонам измерения как C_X , так и $\operatorname{tg} \delta$.

Токоограничивающее устройство R_A служит для установки значения тока I , которое ограничено максимально допустимым значением напряжений в цепи с низковольтными электронными компонентами: амплитуды напряжений ИЦ не должны превышать уровень логических напряжений. Ограничимся величиной 1,6 В действующих значений напряжений. Наибольшим из напряжений ИЦ является U_{S2} , которое может достичь значения

$$U_{S2 \max} = I \sqrt{(R_1 + R_2 + R_X)^2 + X_{C \max}^2} = I \sqrt{(R_1 + R_2 + R_X)^2 + X_{C \max}^2},$$

где $R_1 + R_X + R_2 = 594,177 \text{ кОм}$, $X_{C \max} = \frac{1}{\omega C_{X \min}} \approx 160 \text{ кОм}$. Следовательно, при ограничении $U_{S2 \max} = 1,6 \text{ В}$ получаем $I = 2,75 \text{ мкА}$. При таком токе сопротивление опорного резистора R_N не должно быть больше значения, при котором напряжение $U_N = 1,6 \text{ В}$, то есть $R_N = 3,5/6 \cdot 10^{-6} \approx 582 \text{ кОм}$.

Заключение. С помощью разработанной схемы ИЦ можно применять фазовый метод для раздельного измерения параметров низковольтных конденсаторов с малыми диэлектрическими потерями, а с помощью изложенной методики расчета ИЦ - осуществлять ее оптимальное проектирование для любых диапазонов изменения измеряемых параметров.

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., Никогосян Д.С. Методика расчета параметров измерительной цепи фазометрического измерителя емкости и тангенса угла потерь конденсаторов // Вестник НПУА: Электротехника, энергетика. - 2017. - №2. – С. 70-82.

5. 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

**ՓՈՔԻ ԴԻԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ԿՈՐՈՒՍՏՆԵՐՈՎ ՑԱԾՐԱՎՈՒՄ
ԿՈՆԴԵՆՍԱՏՈՐՆԵՐԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ԻՆՎԱՐԻԱՆՏ ԿԵՐՊԱՓՈԽՈՒՄԸ
ՓՈՒԼԱՅԻՆ ԱԶԴԱՆՇԱՆԻ**

Նկարագրված է չափման շղթա (ՉՇ)՝ նախատեսված փոքր դիէլեկտրական կորուստներով ցածրավոլտ կոնդենսատորների ունակությունն ու տանգենս դելտան փուլային ազդանշանի կերպափոխման համար: Շարադրված է ՉՇ-ի տարրերի պարամետրերի հաշվարկի մեթոդակարգ՝ տրված չափման տիրույթների համար: Գնահատվել է կերպափոխման զգայնությունը:

Առանցքային բառեր. կոնդենսատոր, ունակություն, տանգենս դելտա, չափում, փուլային ազդանշան, կերպափոխման զգայնություն:

B.M. MAMIKONYAN, H.A. AVETISYAN

**INVARIANT CONVERSION OF PARAMETERS OF LOW-VOLTAGE
CAPACITORS WITH SMALL DIELECTRIC LOSSES
INTO A PHASE SIGNAL**

A measuring circuit (MC) designed for separate conversion of capacitance and tangent delta of low-voltage capacitors with small dielectric losses into a phase signal is described. A method of calculating the parameters of MC elements for the given measurement ranges is presented, and the conversion sensitivity is evaluated.

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