

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

рассматриваемой задаче наиболее целесообразным является использование ИЦ по схеме рис. 1а. ИЦ содержит генератор синусоидального напряжения (Γ), в цепи которого включены последовательно токоограничивающее устройство R_A , исследуемый АИД с параметрами R_X и L_X , образцовые резисторы R_1 и R_2 . К выводам резистора R_2 подключены неподвижные контакты электронного переключателя, который управляется от микроконтроллера (МК). ИЦ имеет два выходных напряжения относительно общей точки: напряжение u_X АИД и напряжение u_S общего контакта переключателя; при этом информативным параметром является угол φ фазового сдвига между этими напряжениями. Эти напряжения поступают на аналоговые входы программируемого 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 φ_1 и φ_2 угла φ в двух положениях 1 и 2 переключателя соответственно и по заданным алгоритмам вычисляет параметры АИД.

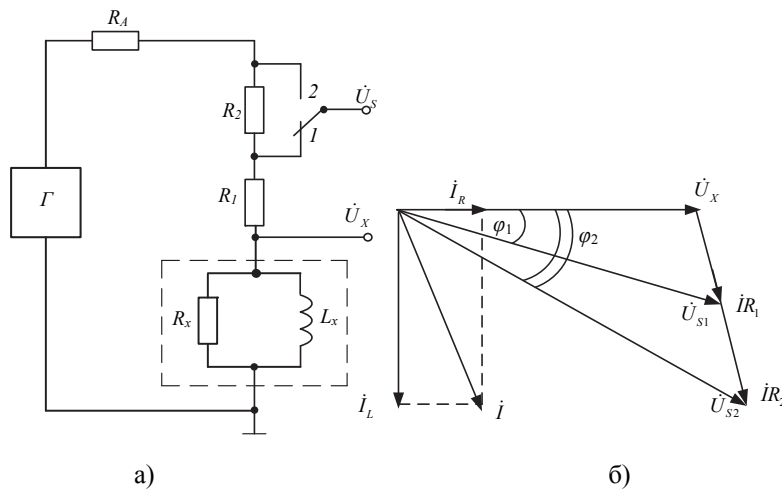


Рис. 1. Схема измерительной цепи (а); векторная диаграмма токов и напряжений (б)

Методика исследования и результаты. Выходные напряжения \dot{U}_X и \dot{U}_S относительно общей точки ИЦ определяются выражениями $\dot{U}_X = \dot{I}Z_X$, $\dot{U}_{S1} = \dot{I}(R_1 + Z_X)$, $\dot{U}_{S2} = \dot{I}(R_1 + R_2 + Z_X)$, где $Z_X = \frac{R_X \cdot j\omega L_X}{R_X + j\omega L_X} = \frac{\omega R_X L_X}{\omega L_X - jR_X}$, а угол φ определяется выражением $\varphi = \psi_{U_X} - \psi_{U_S}$ (рис. 1б).

Отношение выходных напряжений ИЦ в положении 1 переключателя:

$$\frac{\dot{U}_X}{\dot{U}_{S1}} = \frac{Z_X}{R_1 + Z_X} = \frac{\omega R_X L_X [(R_1 + R_X) \omega L_X + j R_1 R_X]}{R_1^2 R_X^2 + \omega^2 L_X^2 (R_1 + R_X)^2},$$

следовательно,

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{\operatorname{Im}(\dot{U}_X / \dot{U}_{S1})}{\operatorname{Re}(\dot{U}_X / \dot{U}_{S1})} = \frac{R_1 R_X}{(R_1 + R_X) \omega L_X}, \quad (1)$$

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

Соответствующими преобразованиями (1) и (2) получаем

$$R_X = \frac{R_1 (R_1 + R_2) (\operatorname{tg} \varphi_2 - \operatorname{tg} \varphi_1)}{R_2 \operatorname{tg} \varphi_1 - R_1 (\operatorname{tg} \varphi_2 - \operatorname{tg} \varphi_1)}, \quad (3)$$

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

В (3) отсутствует L_X , а в (4) - R_X , т.е. обеспечивается раздельное, не зависимое друг от друга (инвариантное) преобразование параметров R_X и L_X , при этом результат преобразования не зависит от измерительного тока. 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 в МК с высокой точностью преобразованием во временной интервал.

Чувствительность преобразования параметров АИД в фазовый сигнал определяется разностью $\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ (из рис. 1б видно, что $\varphi_2 > \varphi_1$). Теоретически, в зависимости от значений R_X и L_X , 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 пределам этого диапазона, так как вблизи углов $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 90^\circ$ значения $\operatorname{tg} \varphi$ или $\operatorname{ctg} \varphi$ стремятся к бесконечности, что в формулах (3) и (4) может привести к неопределенностям и потере чувствительности. В рассматриваемом случае целесообразно, чтобы угол φ не выходил за пределы $10^\circ \leq \varphi \leq 80^\circ$. Для рационального использования шкалы угла φ необходимо согласовать ее с диа-

пазоном значений параметров АИД, что выполняется соответствующим выбором сопротивлений R_1 и R_2 с использованием формул (1) и (2). Расчет выполняем для диапазонов изменения параметров АИД $R_X = 20 \dots 200 \text{ Ом}$, $L_X = 0,01 \dots 0,1 \text{ Гн}$ при частоте $f = 100 \text{ Гц}$ измерительного тока.

Поскольку $\varphi_1 < \varphi_2$, то в (1) должно выполняться условие

$$\operatorname{tg} \varphi_{1 \min} = \frac{R_1 R_{X \min}}{(R_1 + R_{X \min}) \omega L_{X \max}} = \operatorname{tg} 10^\circ = 0,176,$$

откуда получаем $R_1 = 24,7 \text{ Ом}$. Аналогично, по формуле (2):

$$\operatorname{tg} \varphi_{2 \max} = \frac{(R_1 + R_2) R_{X \max}}{(R_1 + R_2 + R_{X \max}) \omega L_{X \min}} = \operatorname{tg} 80^\circ = 5,67,$$

откуда следует $R_2 = 18,62 \text{ Ом}$.

При этих значениях параметров элементов ИЦ выполнен расчет значений переменных и чувствительности преобразования $\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ вдоль шкалы угла φ (см. табл.).

Таблица

Значения переменных и результаты расчета чувствительности преобразования $\Delta \varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ при $f = 100 \text{ Гц}$, $R_1 = 24,7 \text{ Ом}$, $R_2 \approx 18,62 \text{ Ом}$, $\varphi = (\varphi_1 + \varphi_2)/2$

| R_X , Ом | L_X , мГн | $\operatorname{tg} \varphi_1$ | $\operatorname{tg} \varphi_2$ | φ_1 , град. | φ_2 , град. | φ , град. | $\Delta \varphi$, град. |
|---------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------|------------------------|----------------------|-----------------------------|
| 20 | 100 | 0,176 | 0,218 | 10,000 | 12,293 | 11,146 | 2,293 |
| 30 | 95 | 0,227 | 0,297 | 12,789 | 16,546 | 14,667 | 3,757 |
| 40 | 90 | 0,270 | 0,368 | 15,109 | 20,201 | 17,655 | 5,092 |
| 50 | 85 | 0,310 | 0,435 | 17,208 | 23,499 | 20,353 | 6,291 |
| 60 | 80 | 0,348 | 0,501 | 19,188 | 26,597 | 22,892 | 7,409 |
| 80 | 70 | 0,429 | 0,639 | 23,234 | 32,589 | 27,911 | 9,355 |
| 100 | 60 | 0,526 | 0,802 | 27,729 | 38,735 | 33,232 | 11,006 |
| 120 | 50 | 0,652 | 1,014 | 33,104 | 45,387 | 39,245 | 12,283 |
| 130 | 45 | 0,734 | 1,150 | 36,295 | 48,984 | 42,639 | 12,689 |
| 140 | 40 | 0,836 | 1,317 | 39,888 | 52,790 | 46,339 | 12,902 |
| 150 | 35 | 0,967 | 1,529 | 44,024 | 56,818 | 50,421 | 12,794 |
| 160 | 30 | 1,136 | 1,809 | 48,635 | 61,072 | 54,853 | 12,437 |
| 170 | 25 | 1,374 | 2,199 | 53,945 | 65,545 | 59,745 | 11,600 |
| 180 | 20 | 1,729 | 2,780 | 59,959 | 70,215 | 65,087 | 10,256 |
| 190 | 15 | 2,320 | 3,745 | 66,685 | 75,049 | 70,867 | 8,364 |
| 195 | 12,5 | 2,793 | 4,515 | 70,301 | 77,512 | 73,906 | 7,211 |
| 200 | 10 | 3,501 | 5,670 | 74,057 | 80,000 | 77,028 | 5,943 |

По результатам расчетов построен график зависимости $\Delta\varphi = f(\varphi)$ (рис. 2). Видно, что чувствительность максимальна в середине шкалы у отметки $\varphi = 45^\circ$ и минимальна в начале и конце диапазона угла φ . Заметим, что диапазоны изменения R_X и L_X подобраны таким образом, чтобы выбранная шкала угла φ соответствовала как R_X , так и L_X .

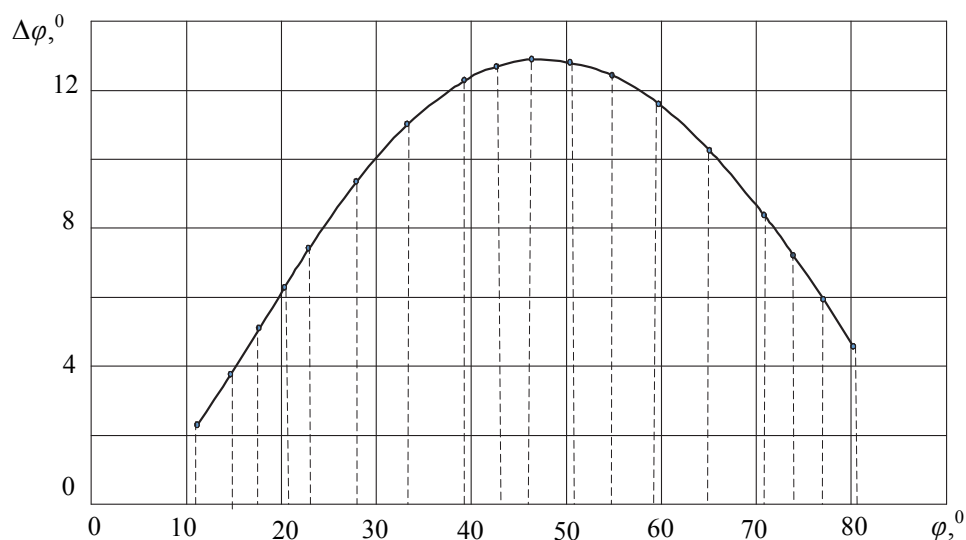


Рис. 2. Кривая изменения чувствительности преобразования параметров АИД в фазовый сигнал вдоль шкалы угла φ

Выводы. Фазовый метод измерения параметров АИД с параллельным соединением $R - L$ обеспечивает при соответствующем выборе схемы ИЦ инвариантность измерения. Разработанная методика расчета параметров элементов ИЦ позволяет рационально согласовать диапазоны изменения параметров АИД со шкалой угла φ фазового сдвига между выходными синусоидальными напряжениями ИЦ. Чувствительность преобразования параметров АИД в фазовый сигнал максимальна в середине шкалы и уменьшается по мере приближения к краям диапазона $0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ и стремится к нулю в начале и конце этого диапазона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мартяшин А.И., Куликовский К.Л., Куроедов С.К., Орлова Л.В. Основы инвариантного преобразования параметров электрических цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 216 с.

2. **Мамиконян Б.М.** Измерение параметров пассивных электрических двухполюсников фазовым методом // Вестник НПУА: Электротехника, энергетика. - 2017. - №1. – С. 67-76.
3. **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, Ս.Ա. ԴԱԶԱՐՅԱՆ

**ԱԿՏԻՎ-ԻՆԴՈՒԿՏԻՎ ԵՐԿԲԵՎԵՌԱՆՈՒ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ԻՆՎԱՐԻԱՆՏ
ՉԱՓՈՒՄԸ ՓՈՒԼԱՅԻՆ ՄԵԹՈՂՈՎ**

Հետազոտված է ակտիվ-ինդուկտիվ երկբևեռանու պարամետրերի ինվարիանտ չափման համար նախատեսված միկրոկոնտրոլերային չափիչի չափման շղթան (ՉԾ), շարադրված է ՉԾ-ի տարրերի պարամետրերի հաշվարկի և չափվող պարամետրերը փոլային ազդանշանի կերպափոխման զգայնության վերլուծության մեթոդակարգը:

Առանցքային բառեր. երկբևեռանի, չափում, փոլային մեթոդ, կերպափոխման զգայնություն:

B.M. MAMIKONYAN, S.A. GHAZARYAN

**INVARIANT MEASUREMENT OF THE PARAMETERS OF AN ACTIVE-
INDUCTIVE BIPOLAR BY THE PHASE METHOD**

The measuring circuit (MC) of a microcontroller meter designed for invariant measurement of the parameters of an active-inductive bipolar is investigated. A method for calculating the parameters of the MC elements and analyzing the sensitivity of converting the measured parameters into a phase signal is described.

Keywords: two-pole, measurement, phase method, conversion sensitivity.