

А. С. Колдов, А. В. Светлов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕРЕЗОНАНСНЫХ ЧЕТЫРЕХЭЛЕМЕНТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СОВОКУПНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

A. S. Koldov, A. V. Svetlov

DETERMINING OF NON-RESONANT FOUR-ELEMENT CIRCUIT PARAMETERS WITH USING OF AGGREGATE MEASUREMENTS METHOD

А н н о т а ц и я. *Цель работы.* Разработка средств измерений параметров нерезонансных четырехэлементных электрических цепей (ЭЦ) с минимальным числом аналоговых преобразований выходного сигнала измерительной цепи. *Материалы и методы.* Преобразования измерительных сигналов выполняются на программном уровне с использованием метода совокупных измерений, когда искомые значения параметров определяются путем решения системы уравнений. *Результаты.* Приведены схемы измерительных цепей, рекомендации по выбору режимов измерений и расчетные соотношения для вычисления искомых параметров элементов цепей. *Выводы.* Результаты экспериментальных исследований подтверждают возможность определения параметров четырехэлементных ЭЦ с использованием совокупного метода измерений.

A b s t r a c t. *Background.* Development of instruments for measuring parameters of non-resonant four-element circuit with a minimum number of analog transforms of the output signal of the measuring circuit. *Materials and methods.* Conversion of measuring signals are performed at the program level using the method of aggregate measurements, when the required parameter values are determined by solving a system of equations. *Results.* Scheme of measuring circuit, recommendations for the choice of measurement modes and calculated ratios to calculate the required parameters of the elements of the chains are given. *Conclusions.* The experimental studies results confirm the possibility of determining of non-resonant four-element circuit parameters with using of aggregate measurements method.

К л ю ч е в ы е с л о в а: нерезонансная четырехэлементная электрическая цепь, совокупные измерения.

K e y w o r d s: non-resonant four-element circuit, aggregate measurements.

При описании электрических свойств полупроводниковых структур, диэлькометрических и кондуктометрических датчиков, а также многих других объектов используются многоэлементные, в частности четырехэлементные, эквивалентные электрические схемы [1–3]. Разработан ряд измерительных преобразователей [4–6] параметров многоэлементных электрических цепей (ЭЦ). К числу недостатков большинства известных измерительных преобразователей следует отнести сложность аппаратной реализации и невысокую точность из-за увеличения случайной погрешности при последовательном выполнении нескольких аналоговых преобразований. Данная работа посвящена разработке средств измерений параметров нерезонансных четырехэлементных ЭЦ с минимальным числом аналоговых преобразований выходного сигнала измерительной цепи (ИЦ), осуществляющей преобразование сопротивления

исследуемой ЭЦ в напряжение. Выполняется единственное аналоговое преобразование: с помощью быстродействующих устройств выборки и хранения (УВХ) берутся отсчеты выходного напряжения ИЦ в характерные моменты времени переходного процесса в ИЦ после подачи импульсного тестового воздействия. После «оцифровки» с помощью АЦП выходных напряжений УВХ дальнейшие преобразования измерительных сигналов с целью получения информации о параметрах элементов ЭЦ выполняются на программном уровне с использованием метода совокупных измерений, когда искомые значения параметров элементов ЭЦ определяются путем решения системы уравнений, связывающих измеренные значения отсчетов выходного напряжения ИЦ и параметры постоянной, линейно и экспоненциально изменяющихся составляющих этого напряжения, функционально связанных с параметрами элементов ЭЦ [7].

Переход от аналоговых преобразований измеряемых величин к цифровой обработке выходных сигналов ИЦ с использованием метода совокупных измерений позволяет предельно упростить аппаратную часть и способствовать повышению точности средств измерений.

Предложена методика совокупных измерений параметров нерезонансных четырехэлементных RC -, RL - и RLC -цепей (табл. 1), у которых переходный процесс в ИЦ носит аперидический характер, а выходное напряжение ИЦ не содержит гармонических колебательных составляющих.

Таблица 1

1		2		3		4	
5		6		7		8	
9		10		11		12	
13		14		15		16	

1. Выбирается место включения исследуемой ЭЦ: во входной цепи операционного усилителя (ОУ) или в цепи его отрицательной обратной связи.

2. Выбирается вид импульсного тестового сигнала (последовательности прямоугольных с амплитудой U_0 или треугольных с крутизной $\frac{U_0}{\tau_0}$ импульсов), исходя из возможности по-

лучения выходного напряжения ИЦ в виде совокупности постоянной составляющей, линейно изменяющейся составляющей и экспоненциально изменяющихся составляющих (спадающей либо возрастающей):

$$U_{\text{вых}}(t) = A_0 + A_1 t + A_2 e^{-\frac{t}{\tau}} + A_3 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (1)$$

причем использование обобщенных A -параметров A_0, A_1, A_2, A_3, τ позволяет применять данную методику для целого ряда ЭЦ.

3. Выбирается амплитуда импульсов тестового сигнала и рассчитывается номинальное значение параметра опорного элемента. Выбираются моменты отсчетов t_1, t_2 выходного

напряжения ИЦ на экспоненциальном участке переходного процесса и моменты t_{1y} и t_{2y} в установившемся режиме. Постоянная составляющая A_0 в (1) находится не путем непосредственного измерения начального значения $U(t_0)$ выходного напряжения ИЦ, а путем экстраполяции по значениям этого напряжения, измеренным в другие моменты времени t_1 и t_2 , где в меньшей степени сказывается неидеальность ОУ. Обычно $t_2 = 2 t_1$ [8].

4. На вход ИЦ подается опорное напряжение, измеряются отсчеты выходного напряжения ИЦ $U(t_1)$, $U(t_2)$, $U(t_{1y})$, $U(t_{2y})$, для которых составляется система уравнений в обобщенных A -параметрах, причем число уравнений должно быть равно числу искомых параметров ЭЦ. Устанавливаются соотношения между параметрами элементов ЭЦ и обобщенными A -параметрами. Для четырехэлементных нерезонансных ЭЦ системы могут быть составлены из уравнений одного из видов

$$U_{\text{вых}}(t) = A_0 + A_1 t + A_3 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}); \tag{2}$$

$$U_{\text{вых}}(t) = A_0 + A_1 t + A_2 e^{-\frac{t}{\tau}}; \tag{3}$$

$$U_{\text{вых}}(t) = A_1 t + A_2 e^{-\frac{t}{\tau}} + A_3 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}). \tag{4}$$

Например, система, составленная из уравнений (2), имеет вид

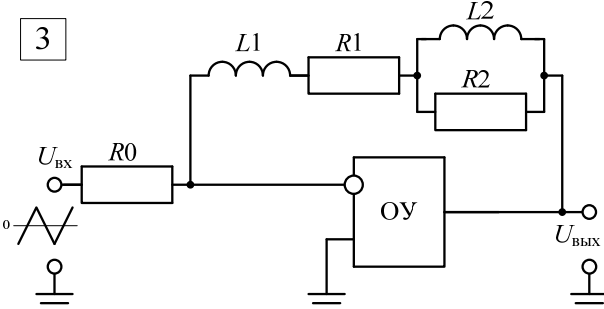
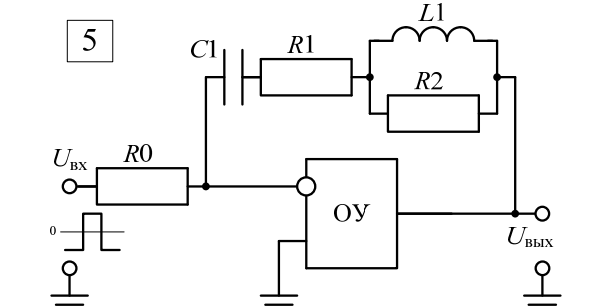
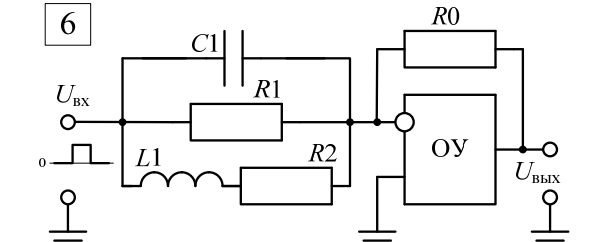
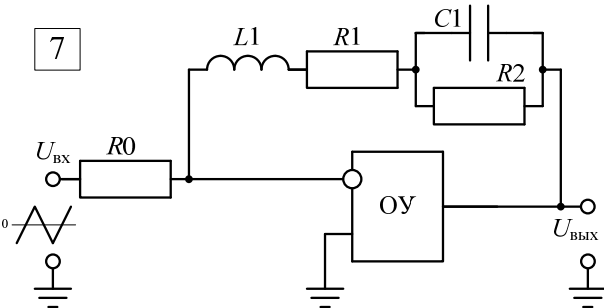
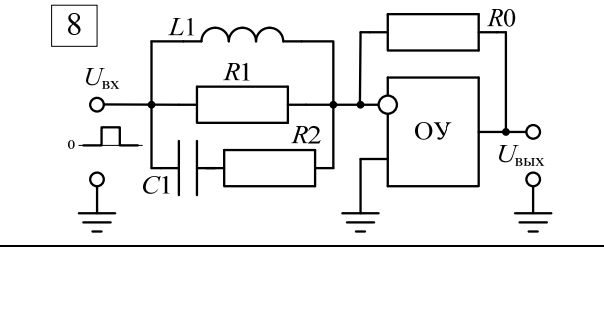
$$\begin{cases} U(t_1) = A_0 + A_1 t_1 + A_3 (1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}); \\ U(t_2) = A_0 + A_1 t_2 + A_3 (1 - e^{-\frac{t_2}{\tau}}); \\ U(t_{1y}) = A_0 + A_1 t_{1y} + A_3 (1 - e^{-\frac{t_{1y}}{\tau}}); \\ U(t_{2y}) = A_0 + A_1 t_{2y} + A_3 (1 - e^{-\frac{t_{2y}}{\tau}}). \end{cases} \tag{5}$$

В табл. 2 для каждой из четырехэлементных ЭЦ из табл. 1 приведены: схема ИЦ; вид тестового импульсного сигнала; характер сопротивления опорного элемента; вид выходного напряжения ИЦ в обобщенных A -параметрах; соотношения для вычисления искомых параметров элементов ЭЦ по найденным A -параметрам.

Таблица 2

	$U_{\text{вых}}(t) = A_0 + A_1 t + A_3 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$	
$C_1 = \frac{U_0}{A_1 R_0}$	$R_1 = \frac{A_0 R_0}{U_0}$	
$C_2 = \frac{U_0 \tau}{A_3 R_0}$	$R_2 = \frac{A_3 R_0}{U_0}$	
	$U_{\text{вых}}(t) = A_0 + A_1 t + A_3 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$	
$C_1 = \frac{A_0 C_0}{U_0}$	$R_1 = \frac{U_0}{A_1 C_0}$	
$C_2 = \frac{A_3 C_0}{U_0}$	$R_2 = \frac{\tau U_0}{A_3 C_0}$	

Продолжение табл. 2

<p>3</p> 	$U_{\text{ВЫХ}}(t) = A_0 + A_1 t + A_3(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$	
	$L_1 = \frac{A_0 R_0 \tau_0}{U_0}$	$R_1 = \frac{A_1 R_0 \tau_0}{U_0}$
	$L_2 = \frac{A_3 R_0 \tau_0}{U_0}$	$R_2 = \frac{A_3 R_0 \tau_0}{U_0 \tau}$
<p>4</p> 	$U_{\text{ВЫХ}}(t) = A_0 + A_1 t + A_3(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$	
	$L_1 = \frac{U_0 R_0}{A_1}$	$R_1 = \frac{U_0 R_0}{A_0}$
	$L_2 = \frac{U_0 R_0 \tau}{A_3}$	$R_2 = \frac{U_0 R_0}{A_3}$
<p>5</p> 	$U_{\text{ВЫХ}}(t) = A_0 + A_1 t + A_2 e^{-\frac{t}{\tau}}$	
	$C_1 = \frac{U_0}{A_1 R_0}$	$R_1 = \frac{A_0 R_0}{U_0}$
	$L_1 = \frac{A_2 R_0 \tau}{U_0}$	$R_2 = \frac{A_2 R_0}{U_0}$
<p>6</p> 	$U_{\text{ВЫХ}}(t) = A_0 + A_1 t + A_3(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$	
	$C_1 = \frac{A_0 C_0}{U_0}$	$R_1 = \frac{U_0 \tau}{C_0 (A_1 \tau - A_3)}$
	$L_1 = \frac{U_0 \tau^2}{A_3 C_0}$	$R_2 = \frac{U_0 \tau}{A_3 C_0}$
<p>7</p> 	$U_{\text{ВЫХ}}(t) = A_0 + A_1 t + A_3(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$	
	$L_1 = \frac{A_0 R_0 \tau_0}{U_0}$	$R_1 = \frac{(A_1 \tau - A_3) R_0 \tau_0}{U_0 \tau}$
	$C_1 = \frac{U_0 \tau^2}{A_3 R_0 \tau_0}$	$R_2 = \frac{A_3 R_0 \tau_0}{U_0 \tau}$
<p>8</p>	$U_{\text{ВЫХ}}(t) = A_0 + A_1 t + A_2 e^{-\frac{t}{\tau}}$	
	$L_1 = \frac{U_0 R_0}{A_1}$	$R_1 = \frac{U_0 R_0}{A_0}$
	$C_1 = \frac{A_2 \tau}{U_0 R_0}$	$R_2 = \frac{U_0 R_0}{A_2}$

Продолжение табл. 2

<p>9</p>	$U_{\text{BЫX}}(t) = A_0 + A_1 t + A_3 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$	
$R_1 = \frac{A_0 R_0}{U_0}$	$C_2 = \frac{U_0 A_3}{A_1 R_0 (A_3 + A_1 \tau)}$	
$C_1 = \frac{U_0 \tau}{R_0 (A_3 + A_1 \tau)}$	$R_2 = \frac{R_0 (A_3 + A_1 \tau)^2}{A_3 U_0}$	
<p>10</p>	$U_{\text{BЫX}}(t) = A_1 \cdot t + A_2 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + A_3 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$	
$R_1 = \frac{U_0}{A_1 C_0}$	$C_2 = \frac{A_2 A_3 C_0}{U_0 (A_3 - A_2)}$	
$C_1 = \frac{A_3 C_0}{U_0}$	$R_2 = \frac{U_0 \tau (A_3 - A_2)}{A_3^2 C_0}$	
<p>11</p>	$U_{\text{BЫX}}(t) = A_1 \cdot t + A_2 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + A_3 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$	
$R_1 = \frac{A_1 R_0 \tau_0}{U_0}$	$L_2 = \frac{A_2 A_3 R_0 \tau_0}{U_0 (A_3 - A_2)}$	
$L_1 = \frac{A_3 R_0 \tau_0}{U_0}$	$R_2 = \frac{A_3^2 R_0 \tau_0}{U_0 \tau (A_3 - A_2)}$	
<p>12</p>	$U_{\text{BЫX}}(t) = A_0 + A_1 \cdot t + A_3 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$	
$R_1 = \frac{U_0 R_0}{A_0}$	$L_2 = \frac{U_0 A_3 R_0}{A_1 (A_3 + A_1 \tau)}$	
$L_1 = \frac{U_0 R_0 \tau}{A_3 + A_1 \tau}$	$R_2 = \frac{A_3 U_0 R_0}{(A_3 + A_1 \tau)^2}$	
<p>13</p>	$U_{\text{BЫX}}(t) = A_1 \cdot t + A_2 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + A_3 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$	
$C_1 = \frac{U_0}{A_1 R_0}$	$C_2 = \frac{U_0 \tau (A_3 - A_2)}{A_3^2 R_0}$	
$R_1 = \frac{A_3 R_0}{U_0}$	$R_2 = \frac{A_2 A_3 R_0}{U_0 (A_3 - A_2)}$	
<p>14</p>	$U_{\text{BЫX}}(t) = A_0 + A_1 \cdot t + A_3 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$	
$C_1 = \frac{A_0 C_0}{U_0}$	$C_2 = \frac{C_0 (A_3 + A_1 \tau)^2}{A_3 U_0}$	
$R_1 = \frac{U_0 \tau}{C_0 (A_3 + A_1 \tau)}$	$R_2 = \frac{U_0 A_3}{A_1 C_0 (A_3 + A_1 \tau)}$	

<p>15</p>	$U_{\text{ВЫХ}}(t) = A_0 + A_1 \cdot t + A_3 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$ $L_1 = \frac{A_0 R_0 \tau_0}{U_0} \quad L_2 = \frac{R_0 (A_3 + A_1 \tau)^2 \tau_0}{U_0 A_3}$ $R_1 = \frac{R_0 (A_3 + A_1 \tau) \tau_0}{U_0 \tau} \quad R_2 = \frac{A_1 R_0 (A_3 + A_1 \tau) \tau_0}{A_3 U_0}$
<p>16</p>	$U_{\text{ВЫХ}}(t) = A_1 \cdot t + A_2 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + A_3 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$ $L_1 = \frac{U_0 R_0}{A_1} \quad L_2 = \frac{U_0 R_0 \tau (A_3 - A_2)}{A_3^2}$ $R_1 = \frac{U_0 R_0}{A_3} \quad R_2 = \frac{U_0 R_0 (A_3 - A_2)}{A_2 A_3}$

5. Осуществляется решение систем, составленных из уравнений (2) – (4) относительно обобщенных A -параметров численными методами или находится упрощенное аналитическое решение уравнений для непосредственного вычисления искомых A -параметров, реализуемого в виде исполняемых файлов для микроконтроллеров. Особенностью упрощенных алгоритмов является то, что к моментам получения двух последних отсчетов выходного напряжения ИЦ экспоненциальный переходный процесс в ИЦ считается полностью установившимся. Методическая погрешность определения A -параметров, обусловленная таким упрощением, по результатам исследований авторов может быть получена в пределах 0,5 %.

Упрощенные аналитические решения системы уравнений (5):

$$A_0 = U(t_{2y}) - A_1 t_{2y} - A_3; \quad (6)$$

$$A_1 = \frac{U(t_{2y}) - U(t_{1y})}{t_{2y} - t_{1y}}; \quad (7)$$

$$A_3 = \frac{[t_{2y}(U(t_{1y}) - U(t_1)) + t_1(U(t_{2y}) - U(t_{1y})) - t_{1y}(U(t_{2y}) - U(t_1))]^2}{(t_{2y} - t_{1y})(t_{1y}(U(t_{2y}) - U(2t_1)) - t_{2y}(U(t_{1y}) - U(2t_1)) - 2t_1(U(t_{2y}) - U(t_{1y})))}; \quad (8)$$

$$\tau = \frac{t_1}{\ln \left[\frac{t_{2y}(U(t_{1y}) - U(t_1)) + t_1(U(t_{2y}) - U(t_{1y})) - t_{1y}(U(t_{2y}) - U(t_1))}{t_{2y}(U(t_{1y}) - U(2t_1)) + 2t_1(U(t_{2y}) - U(t_{1y})) - t_{1y}(U(t_{2y}) - U(2t_1))} \right]}. \quad (9)$$

Упрощенные аналитические решения системы, составленной из уравнений (3), имеют следующий вид:

$$A_0 = \frac{t_{1y} U(t_{2y}) - t_{2y} U(t_{1y})}{t_{2y} - t_{1y}}; \quad (10)$$

$$A_1 = \frac{U(t_{2y}) - U(t_{1y})}{t_{2y} - t_{1y}}; \quad (11)$$

$$A_2 = \frac{[t_{2y}(U(t_{1y}) - U(t_1)) + t_1(U(t_{2y}) - U(t_{1y})) - t_{1y}(U(t_{2y}) - U(t_1))]^2}{(t_{2y} - t_{1y})(t_{1y}(U(t_{2y}) - U(2t_1)) - t_{2y}(U(t_{1y}) - U(2t_1)) - 2t_1(U(t_{2y}) - U(t_{1y})))}; \quad (12)$$

$$\tau = \frac{t_1}{\ln \left[\frac{t_{2y}(U(t_{1y}) - U(t_1)) + t_1(U(t_{2y}) - U(t_{1y})) - t_{1y}(U(t_{2y}) - U(t_1))}{t_{2y}(U(t_{1y}) - U(2t_1)) + 2t_1(U(t_{2y}) - U(t_{1y})) - t_{1y}(U(t_{2y}) - U(2t_1))} \right]}. \quad (13)$$

Упрощенные аналитические решения системы, составленной из уравнений (4), имеют следующий вид (без громоздкой подстановки):

$$A_1 = \frac{U(t_{2y}) - U(t_{1y})}{t_{2y} - t_{1y}}; \quad (14)$$

$$A_2 = \frac{(A_1 t_1 - U(t_1))^2 + A_3 (U(2t_1) - 2U(t_1))}{A_3 - U(2t_1) + 2A_1 t_1}; \quad (15)$$

$$A_3 = \frac{t_{1y} U(t_{2y}) - t_{2y} U(t_{1y})}{t_{2y} - t_{1y}}; \quad (16)$$

$$\tau = \frac{t_1}{\ln \left[\frac{A_3 - U(t_1) + A_1 t_1}{A_3 - U(2t_1) + 2A_1 t_1} \right]}. \quad (17)$$

6. По полученным значениям A -параметров вычисляются значения параметров элементов ЭЦ.

На рис. 1 приведена структурная схема установки для измерения параметров нерезонансных многоэлементных ЭЦ.

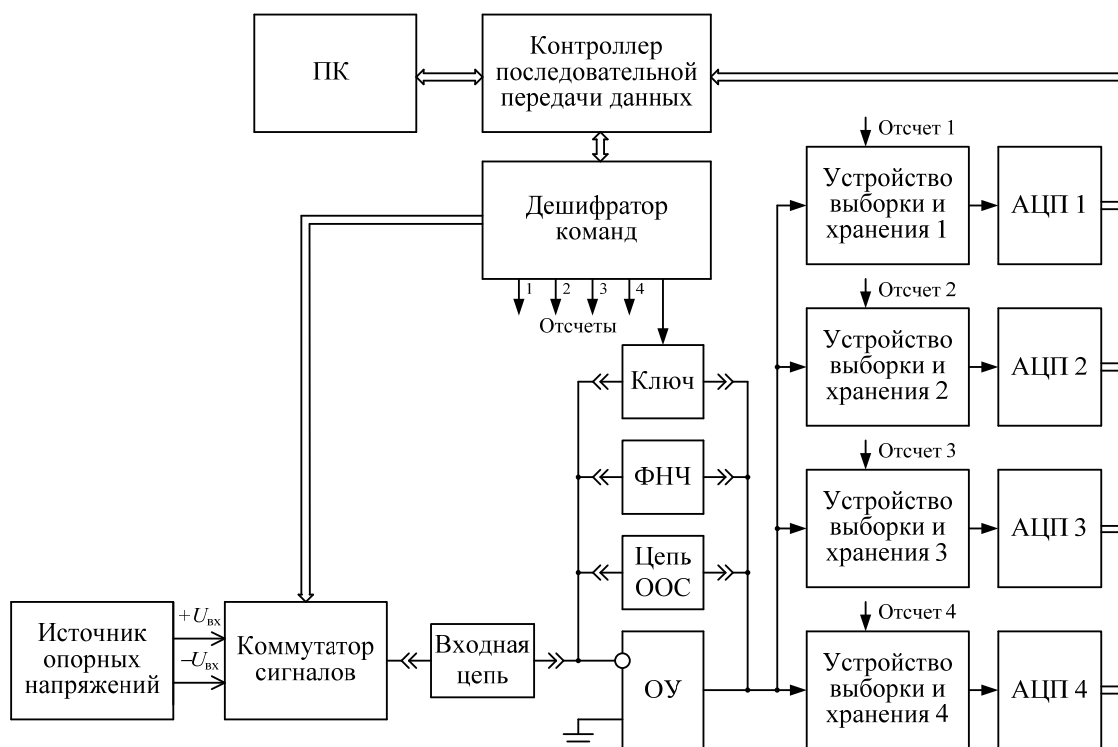


Рис. 1. Структурная схема установки для измерения параметров нерезонансных многоэлементных ЭЦ

Исследуемая ЭЦ может быть включена как на входе, так и в цепи отрицательной обратной связи (ООС) ОУ. Входное воздействие (тестовый сигнал) в виде одно- или двухполярной последовательностей прямоугольных или треугольных импульсов формируется путем коммутации опорных напряжений. Стабилизация режима ОУ по постоянному току при использова-

нии однополярных тестовых сигналов осуществляется путем принудительного разряда емкостей в цепи ООС ОУ с помощью аналогового ключа, а при использовании двухполярных тестовых сигналов – с помощью фильтра нижних частот (ФНЧ) в цепи ООС ОУ. Измерение значений отсчетов выходного напряжения ИЦ осуществляется устройствами выборки и хранения (УВХ) и аналого-цифровыми преобразователями (АЦП), число которых определяется числом элементов ЭЦ. Работой установки управляет персональный компьютер (ПК) с соответствующим программным обеспечением. Формирование команд, управляющих аппаратной частью установки, и сбор измерительной информации осуществляются с помощью контроллера последовательной передачи данных и дешифратора команд.

При макетировании данной установки авторами использовались ОУ К544УД2, коммутатор сигналов К590КН4, аналоговый ключ ADG736, УВХ 1100СК2 или AD781, АЦП МСР3424.

Заключение

Переход от аналоговых преобразований измеряемых величин к цифровой обработке выходных сигналов ИЦ с использованием метода совокупных измерений позволяет предельно упростить аппаратную часть, избавиться от увеличения случайной погрешности при последовательном выполнении нескольких аналоговых преобразований, что способствует повышению точности измерений. Предложенная методика применяется при построении многофункциональных аппаратно-программных комплексов для измерения параметров ЭЦ [10]. Результаты экспериментальных исследований подтверждают возможность определения параметров нерезонансных четырехэлементных ЭЦ с использованием совокупного метода измерений при относительной погрешности определения параметров элементов ЭЦ не более 1,5–2 %.

Библиографический список

1. Берлинер, М. А. Измерения влажности / М. А. Берлинер. – Москва : Энергия, 1973. – 400 с.
2. Лопатин, Б. А. Теоретические основы электрохимических методов анализа / Б. А. Лопатин. – Москва : Высш. шк., 1975. – 295 с.
3. Кнеллер, В. Ю. Определение параметров многоэлементных двухполюсников / В. Ю. Кнеллер, Л. П. Боровских. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
4. Мартяшин, А. И. Основы инвариантного преобразования параметров электрических цепей / А. И. Мартяшин, К. Л. Куликовский, С. К. Куроедов, Л. В. Орлова. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 216 с.
5. Колдов, А. С. Синтез измерительного преобразователя для измерения проводимости кондуктометрического датчика / А. С. Колдов, В. И. Кулапин // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 1. – С. 250–251.
6. Мартяшин, А. И. Перспективные направления развития измерителей параметров многоэлементных электрических цепей / А. И. Мартяшин, А. В. Светлов // Актуальные проблемы науки и образования : тр. Междунар. юбилейного симп. : в 2 т. – Пенза : Инф.-изд. центр ПензГУ, 2003. – Т. 2. – С. 288–290.
7. Светлов, А. В. Совокупные измерения параметров многоэлементных электрических цепей / А. В. Князьков, А. С. Колдов, Н. В. Родионова, А. В. Светлов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 3 (25). – С. 69–78.
8. Светлов, А. В. Определение параметров двухполюсников по значениям дискретных отсчетов выходного напряжения измерительной схемы / А. Н. Андреев, В. А. Казаков, А. В. Светлов, Д. А. Светлов // Измерительная техника. – 1999. – № 8. – С. 19–22.
9. Колдов, А. С. Оценка случайных погрешностей измерительных преобразователей / А. С. Колдов, Н. В. Родионова, А. В. Светлов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 4 (26). – С. 76–84.
10. Светлов, А. В. Аппаратно-программный комплекс для измерения параметров электрических цепей / А. В. Светлов, И. В. Ушенина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 1. – С. 81–89.

References

1. Berliner M. A. *Izmereniya vlazhnosti* [Humidity measurement]. Moscow: Energiya, 1973, 400 p. [In Russian]
2. Lopatin B. A. *Teoreticheskie osnovy elektrokhimicheskikh metodov analiza* [Theoretical basis of electrochemical analysis methods]. Moscow: Vyssh. shk., 1975, 295 p. [In Russian]

3. Kneller V. Yu., Borovskikh L. P. *Opreделение parametrov mnogoelementnykh dvukhpolyusnikov* [Determination of parameters of multi-element bipolars]. Moscow: Energoatomizdat, 1986, 144 p. [In Russian]
4. Martyashin A. I., Kulikovskiy K. L., Kuroedov S. K., Orlova L. V. *Osnovy invariantnogo preobrazovaniya parametrov elektricheskikh tsepey* [Bases of invariant transformation of parameters of electric circuits]. Moscow: Energoatomizdat, 1990, 216 p. [In Russian]
5. Koldov A. S., Kulapin V. I. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2017, vol. 1, pp. 250–251. [In Russian]
6. Martyashin A. I., Svetlov A. V. *Aktual'nye problemy nauki i obrazovaniya: tr. Mezhdunar. yubileynogo simp.: v 2 t.* [Actual problems of science and education: tr. International. jubilee symp. : in 2 vols.]. Penza: Inf.izd. tsentr PenzGU, 2003, vol. 2, pp. 288–290. [In Russian]
7. Svetlov A. V., Knyaz'kov A. V., Koldov A. S., Rodionova N. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2018, no. 3 (25), pp. 69–78. [In Russian]
8. Svetlov A. V., Andreev A. N., Kazakov V. A., Svetlov D. A. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement technology]. 1999, no. 8, pp. 19–22. [In Russian]
9. Koldov A. S., Rodionova N. V., Svetlov A. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2018, no. 4 (26), pp. 76–84. [In Russian]
10. Svetlov A. V., Ushenina I. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2008, no. 1, pp. 81–89. [In Russian]

Колдов Александр Сергеевич

инженер,
кафедра радиотехники и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rtech@pnzgu.ru

Koldov Alexander Sergeevich

engineer,
sub-department of radio engineering
and radio electronic systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Светлов Анатолий Вильевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rtech@pnzgu.ru

Svetlov Anatoliy Vil'evich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of radio engineering
and radio electronic systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Колдов, А. С. Определение параметров нерезонансных четырехэлементных электрических цепей по результатам совокупных измерений / А. С. Колдов, А. В. Светлов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 3 (29). – С. 39–47. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-3-5.