

УДК 621.317.73

doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-8

Измерительная установка для определения параметров многоэлементных электрических цепей

А. В. Светлов¹, А. С. Колдов²

^{1,2}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹rtech@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Цель работы – разработка многофункциональной измерительной установки для определения параметров нерезонансных и резонансных электрических цепей. *Материалы и методы.* В основе работы измерительной установки лежит совокупный метод измерений, при этом электрические параметры (индуктивность, емкость, сопротивление) нерезонансных электрических цепей определяются по результатам анализа выходного напряжения измерительной цепи во временной области, а резонансных электрических цепей – в частотной области. *Результаты.* Приведены структурная схема измерительной установки и расчетные соотношения для определения электрических параметров ряда трех- и четырехэлементных электрических цепей. *Выводы.* Показана возможность нахождения параметров как нерезонансных, так и резонансных электрических цепей с использованием одной измерительной установки.

Ключевые слова: измерительная установка, нерезонансные и резонансные электрические цепи

Для цитирования: Светлов А. В., Колдов А. С. Измерительная установка для определения параметров многоэлементных электрических цепей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 3. С. 78–88. doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-8

A measurement installation for determining multi-element electrical circuit parameters

A.V. Svetlov¹, A.S. Koldov²

^{1,2}Penza State University, Penza, Russia

¹rtech@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The purpose of the study is to develop a multifunction measurement installation to determine parameters of non-resonant and resonant electrical circuits. *Materials and methods.* The installation procedure is based on a combined measurement method, wherein the electrical parameters (inductance, capacitance, and resistance) of non-resonant electrical circuits are determined by analyzing the output voltage of the measuring circuit in the time domain, and those of resonant electrical circuits – in the frequency domain. *Results.* A block diagram for the measurement installation and calculated relationships to determine the electrical parameters of three- and four-element electrical circuits are presented. *Conclusions.* The likelihood of finding both non-resonant and resonant electrical circuit parameters using a single measurement installation is shown.

Keywords: measurement installation, non-resonant and resonant electrical circuits

For citation: Svetlov A.V., Koldov A.S. A measurement installation for determining multi-element electrical circuit parameters. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pov-*

Введение

Для представления электрических свойств множества физических объектов используются эквивалентные двухполосные электрические схемы, в простейшем случае – двухэлементные, отображающие эквивалентные активную и реактивную составляющие комплексного сопротивления объекта. При необходимости более полного анализа электрических свойств объекта в частотной или временной областях используются эквивалентные электрические схемы с большим числом элементов (три или четыре) [1, 2].

В зависимости от характера (апериодический или колебательный) переходных процессов при коммутации электрических цепей (ЭЦ) различают нерезонансные и резонансные ЭЦ. Резонансные ЭЦ характеризуются наличием резонансов токов или напряжений в рабочей области частот. Апериодический переходный процесс в нерезонансных ЭЦ представляется совокупностью постоянной, линейно и экспоненциально изменяющихся составляющих напряжений без затухающих гармонических колебаний.

Для определения параметров многоэлементных резонансных и нерезонансных ЭЦ традиционно используются разные измерительные установки, отличающиеся как по составу аппаратной части (измерительного оборудования), так и по средствам математической обработки результатов измерительного эксперимента.

Важной и актуальной задачей является разработка на основе современных достижений измерительной техники универсальной, многофункциональной измерительной установки для определения параметров любых многоэлементных ЭЦ. При этом переход от аналоговых преобразований выходных напряжений измерительных цепей к программной обработке сигналов позволяет существенно упростить аппаратную часть установки и избежать накопления погрешностей вследствие последовательного выполнения ряда аналоговых преобразований.

1. Структурная схема измерительной установки для определения параметров многоэлементных электрических цепей

При разработке многофункциональной измерительной установки для определения параметров многоэлементных ЭЦ предложено использовать совокупные измерения [3–5] как единую методологическую основу нахождения параметров нерезонансных и резонансных ЭЦ. При этом:

– для преобразования сопротивления исследуемой ЭЦ в напряжение ее включают в состав измерительной цепи (ИЦ), построенной на основе операционного усилителя (ОУ);

– при измерении параметров нерезонансных ЭЦ на вход ИЦ подают тестовые импульсные сигналы и выполняют измерения ряда отсчетов выходного напряжения ИЦ в характерные моменты времени от начала переходного процесса в ИЦ;

– при измерении параметров резонансных ЭЦ на вход ИЦ подают тестовые синусоидальные сигналы и выполняют измерения ряда частот, соответствующих характерным точкам амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ЭЦ, а также выходного напряжения ИЦ на этих частотах;

– составляют и решают систему уравнений, связывающих искомые электрические параметры элементов нерезонансных ЭЦ с результатами анализа выходного напряжения ИЦ во временной области, а резонансных ЭЦ – в частотной области.

Для практической реализации перечисленных действий в состав измерительной установки должны входить следующие блоки (рис. 1):

1. ИЦ на быстродействующем ОУ с входным каскадом на полевых транзисторах, обеспечивающим высокое входное сопротивление. Исследуемая ЭЦ (резонансная или нерезонансная) и опорный элемент (резистор или конденсатор) подключаются к клеммам во входной цепи ОУ или в цепи его отрицательной обратной связи (ООС). Информация о месте включения исследуемой ЭЦ и характере сопротивления опорного элемента приведена ниже. При отсутствии гальванической связи между входом и выходом ОУ устойчивость режима работы ОУ обеспечивается включением в его обратной связи фильтра нижних частот (ФНЧ) или периодически замыкаемого аналогового ключа.

2. Формирование тестовых импульсных сигналов прямоугольной или треугольной формы с заданными амплитудой и периодом повторения, а также синусоидальных сигналов с заданными амплитудой и частотой осуществляется генератором прямого цифрового синтеза DDS, управляемого программно или вручную оператором.

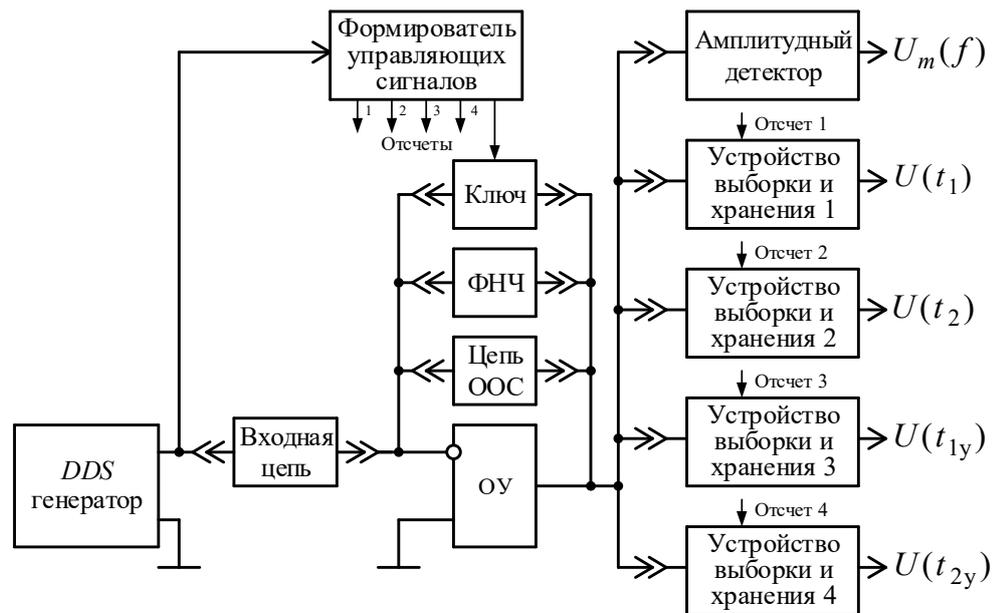


Рис. 1. Структурная схема измерительной установки для определения параметров многоэлементных электрических цепей

3. Измерение амплитуд $U_m(f)$ синусоидального выходного напряжения ИЦ на частотах, соответствующих характерным точкам АЧХ резонансных ЭЦ, осуществляется с помощью амплитудного детектора.

4. При измерении параметров нерезонансных ЭЦ отсчеты выходного напряжения ИЦ $U(t_1)$, $U(t_2)$ на экспоненциальном участке переходного

процесса в ИЦ осуществляются с помощью устройств выборки и хранения 1 и 2; отсчеты выходного напряжения ИЦ $U(t_{1y})$, $U(t_{2y})$ на установившемся участке переходного процесса в ИЦ (после практического завершения экспоненциального переходного процесса) осуществляются с помощью устройств выборки и хранения 3 и 4.

5. Формирователь управляющих сигналов задает значения времени задержки отсчетов 1–4 от начала переходного процесса.

Выходные напряжения амплитудного детектора и устройств выборки и хранения 1–4 измеряются цифровым вольтметром.

2. Определение параметров четырехэлементных нерезонансных ЭЦ

Для определения параметров элементов нерезонансных ЭЦ на вход ИЦ подаются тестовые импульсные сигналы и выполняются анализ выходного напряжения ИЦ во временной области. Полученные с помощью устройств выборки и хранения значения отсчетов выходного напряжения ИЦ в некоторые характерные моменты времени от начала переходного процесса в ИЦ подставляются в систему уравнений, связывающих эти значения отсчетов напряжения с параметрами постоянной, линейно и экспоненциально изменяющихся составляющих выходного напряжения ИЦ функционально связанных с параметрами элементов ЭЦ [3]. Кроме получения упомянутых отсчетов, больше никаких аналоговых преобразований выходного напряжения ИЦ не производится. Важными достоинствами такого построения измерительной установки являются простота аппаратной реализации и отсутствие накопления погрешностей при последовательном выполнении ряда аналоговых преобразований выходного напряжения ИЦ [6, 7].

При определении параметров многоэлементных нерезонансных RC -, RL - и RLC -цепей целесообразно использовать единый формат представления выходного напряжения ИЦ с помощью обобщенных A -параметров [3]. В частности, в случае четырехэлементных нерезонансных ЭЦ [8] выходные напряжения ИЦ могут быть представлены в одном из видов:

$$U_{\text{вых}}(t) = A_0 + A_1 \cdot t + A_3 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right); \quad (1)$$

$$U_{\text{вых}}(t) = A_0 + A_1 \cdot t + A_2 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}; \quad (2)$$

$$U_{\text{вых}}(t) = A_1 \cdot t + A_2 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + A_3 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (3)$$

где A_0 [В] – постоянная составляющая напряжения; A_1 [В/с] – крутизна линейно изменяющейся составляющей напряжения; A_2 [В] – начальное значение спадающей экспоненциальной составляющей; A_3 [В] – конечное (установившееся) значение возрастающей экспоненциальной составляющей; τ [с] – постоянная времени экспоненциальных составляющих напряжения.

Для определения параметров четырехэлементных нерезонансных ЭЦ в соответствии с методом совокупных измерений необходимо составить и

решить системы из четырех уравнений упомянутого вида для четырех моментов времени, отсчитываемых от начала апериодического переходного процесса в ИЦ:

– моменты времени t_1 , t_2 выбираются на экспоненциальном участке переходного процесса;

– моменты времени t_{1y} и t_{2y} – в установившемся режиме, после практического завершения экспоненциального переходного процесса.

Рекомендации по выбору моментов отсчетов выходного напряжения ИЦ с учетом получаемой методической погрешности определения A -параметров приведены в [9].

Параметры A_0 , A_1 , A_2 , A_3 , τ составляющих выходного напряжения ИЦ находятся в результате решения систем уравнений (1)–(3) с подставленными измеренными значениями отсчетов напряжения $U(t_1)$, $U(t_2)$, $U(t_{1y})$, $U(t_{2y})$. Решения систем уравнений могут быть найдены численными методами в среде MathCAD или вычислены по полученным методом подстановки формулам, приведенным в [8]. Искомые значения параметров элементов ЭЦ могут быть найдены с учетом функциональных зависимостей между ними и A -параметрами выходного напряжения ИЦ. Такие зависимости для ряда четырехэлементных нерезонансных ЭЦ приведены в табл. 1 и 2, где также даны схемы ИЦ, показан вид тестового импульсного сигнала, характер сопротивления опорного элемента и вид уравнения (1)–(3), описывающего выходное напряжение ИЦ.

3. Определение параметров резонансных ЭЦ

Резонансные ЭЦ характеризуются частотными параметрами (резонансные частоты, добротность) и электрическими параметрами (индуктивность, емкость, сопротивление), измеренными в резонансной области частот. Структура предлагаемой измерительной установки позволяет измерить как частотные, так и электрические параметры резонансных ЭЦ.

Для определения частотных параметров трехэлементных резонансных ЭЦ на вход ИЦ подают тестовые синусоидальные сигналы, измеряют частоты, соответствующие характерным точкам АЧХ ЭЦ, а также выходные напряжения ИЦ на этих частотах. В качестве таких частот выступают резонансная частота f_0 и частоты f' и f'' ниже и выше резонансной частоты f_0 , при которых амплитуда выходного напряжения ИЦ составляет 0,707 от максимального напряжения U_{m0} на резонансной частоте. По измеренным частотам определяют добротность: $Q = f_0 / (f'' - f')$.

Искомые электрические параметры элементов резонансных ЭЦ: индуктивность L , емкость C и сопротивление R , определяются в результате решения системы трех уравнений, полученных в результате приравнивания математических выражений, описывающих резонансную частоту f_0 , максимальное напряжение на выходе ИЦ U_{m0} и добротность Q , их измеренным значениям [10].

Таблица 1

	ур-е вид1	$C_1 = \frac{U_0}{A_1 R_0}$	$R_1 = \frac{A_0 R_0}{U_0}$
		$C_2 = \frac{U_0 \tau}{A_3 R_0}$	$R_2 = \frac{A_3 R_0}{U_0}$
	ур-е вид1	$C_1 = \frac{A_0 C_0}{U_0}$	$R_1 = \frac{U_0}{A_1 C_0}$
		$C_2 = \frac{A_3 C_0}{U_0}$	$R_2 = \frac{\tau U_0}{A_3 C_0}$
	ур-е вид1	$L_1 = \frac{A_0 R_0 \tau_0}{U_0}$	$R_1 = \frac{A_1 R_0 \tau_0}{U_0}$
		$L_2 = \frac{A_3 R_0 \tau_0}{U_0}$	$R_2 = \frac{A_3 R_0 \tau_0}{U_0 \tau}$
	ур-е вид1	$L_1 = \frac{U_0 R_0}{A_1}$	$R_1 = \frac{U_0 R_0}{A_0}$
		$L_2 = \frac{U_0 R_0 \tau}{A_3}$	$R_2 = \frac{U_0 R_0}{A_3}$
	ур-е вид2	$C_1 = \frac{U_0}{A_1 R_0}$	$R_1 = \frac{A_0 R_0}{U_0}$
		$L_1 = \frac{A_2 R_0 \tau}{U_0}$	$R_2 = \frac{A_2 R_0}{U_0}$
	ур-е вид1	$C_1 = \frac{A_0 C_0}{U_0}$	$R_1 = \frac{U_0 \tau}{C_0 (A_1 \tau - A_3)}$
		$L_1 = \frac{U_0 \tau^2}{A_3 C_0}$	$R_2 = \frac{U_0 \tau}{A_3 C_0}$
	ур-е вид1	$L_1 = \frac{A_0 R_0 \tau_0}{U_0}$	$R_1 = \frac{(A_1 \tau - A_3) R_0 \tau_0}{U_0 \tau}$
		$C_1 = \frac{U_0 \tau^2}{A_3 R_0 \tau_0}$	$R_2 = \frac{A_3 R_0 \tau_0}{U_0 \tau}$
	ур-е вид2	$L_1 = \frac{U_0 R_0}{A_1}$	$R_1 = \frac{U_0 R_0}{A_0}$
		$C_1 = \frac{A_2 \tau}{U_0 R_0}$	$R_2 = \frac{U_0 R_0}{A_2}$

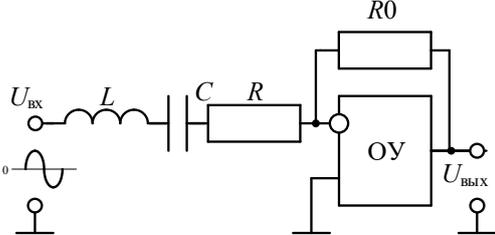
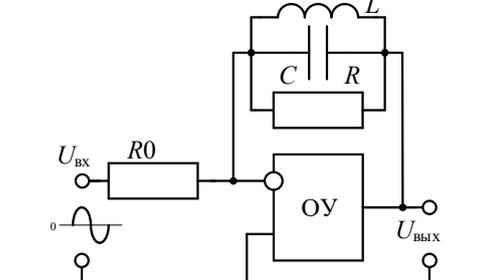
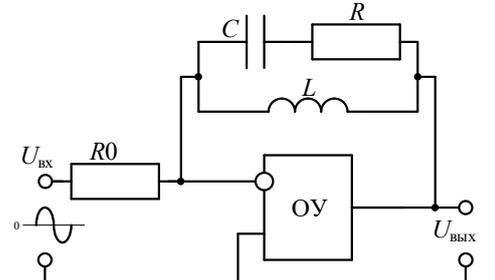
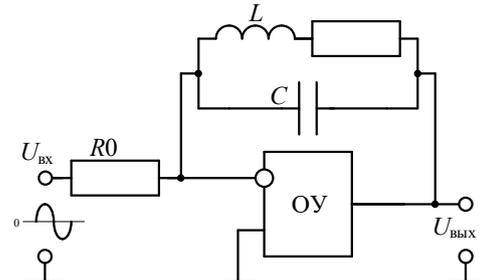
Таблица 2

	ур-е вид1	$R_1 = \frac{A_0 R_0}{U_0}$	$C_2 = \frac{U_0 A_3}{A_1 R_0 (A_3 + A_1 \tau)}$
		$C_1 = \frac{U_0 \tau}{R_0 (A_3 + A_1 \tau)}$	$R_2 = \frac{R_0 (A_3 + A_1 \tau)^2}{A_3 U_0}$
	ур-е вид3	$R_1 = \frac{U_0}{A_1 C_0}$	$C_2 = \frac{A_2 A_3 C_0}{U_0 (A_3 - A_2)}$
		$C_1 = \frac{A_3 C_0}{U_0}$	$R_2 = \frac{U_0 \tau (A_3 - A_2)}{A_3^2 C_0}$
	ур-е вид3	$R_1 = \frac{A_1 R_0 \tau_0}{U_0}$	$L_2 = \frac{A_2 A_3 R_0 \tau_0}{U_0 (A_3 - A_2)}$
		$L_1 = \frac{A_3 R_0 \tau_0}{U_0}$	$R_2 = \frac{A_3^2 R_0 \tau_0}{U_0 \tau (A_3 - A_2)}$
	ур-е вид1	$R_1 = \frac{U_0 R_0}{A_0}$	$L_2 = \frac{U_0 A_3 R_0}{A_1 (A_3 + A_1 \tau)}$
		$L_1 = \frac{U_0 R_0 \tau}{A_3 + A_1 \tau}$	$R_2 = \frac{A_3 U_0 R_0}{(A_3 + A_1 \tau)^2}$
	ур-е вид3	$C_1 = \frac{U_0}{A_1 R_0}$	$C_2 = \frac{U_0 \tau (A_3 - A_2)}{A_3^2 R_0}$
		$R_1 = \frac{A_3 R_0}{U_0}$	$R_2 = \frac{A_2 A_3 R_0}{U_0 (A_3 - A_2)}$
	ур-е вид1	$C_1 = \frac{A_0 C_0}{U_0}$	$C_2 = \frac{C_0 (A_3 + A_1 \tau)^2}{A_3 U_0}$
		$R_1 = \frac{U_0 \tau}{C_0 (A_3 + A_1 \tau)}$	$R_2 = \frac{U_0 A_3}{A_1 C_0 (A_3 + A_1 \tau)}$
	ур-е вид1	$L_1 = \frac{A_0 R_0 \tau_0}{U_0}$	$L_2 = \frac{R_0 (A_3 + A_1 \tau)^2 \tau_0}{U_0 A_3}$
		$R_1 = \frac{R_0 (A_3 + A_1 \tau) \tau_0}{U_0 \tau}$	$R_2 = \frac{A_1 R_0 (A_3 + A_1 \tau) \tau_0}{A_3 U_0}$
	ур-е вид3	$L_1 = \frac{U_0 R_0}{A_1}$	$L_2 = \frac{U_0 R_0 \tau (A_3 - A_2)}{A_3^2}$
		$R_1 = \frac{U_0 R_0}{A_3}$	$R_2 = \frac{U_0 R_0 (A_3 - A_2)}{A_2 A_3}$

Эта система уравнений, как и в случае нерезонансных ЭЦ, может быть решена численными методами или методом подстановки с получением аналитических соотношений для непосредственного вычисления электрических параметров ЭЦ L , C , R по измеренным значениям частотных параметров.

В табл. 3 приведены схемы ИЦ для определения параметров ряда трехэлементных резонансных ЭЦ, а также формулы для вычисления искомых параметров ЭЦ.

Таблица 3

	$R = \frac{U_0 R_0}{U_{m0}}$ $C = \frac{U_{m0}}{2\pi U_0 f_0 R_0 Q}$ $L = \frac{U_0 R_0 Q}{2\pi U_{m0} f_0}$
	$R = \frac{U_{m0} R_0}{U_0}$ $C = \frac{U_0 Q}{2\pi U_{m0} f_0 R_0}$ $L = \frac{U_{m0} R_0}{2\pi U_0 f_0 Q}$
	$R = \frac{U_{m0} R_0 \cdot (Q^2 + 1)}{U_0 \cdot (Q^2 - 1)^2}$ $C = \frac{U_0 \cdot (Q^2 - 1)^2}{2\pi U_{m0} f_0 R_0 Q \cdot (Q^2 + 1)}$ $L = \frac{U_{m0} R_0 \cdot (Q^2 + 1)}{2\pi U_0 f_0 Q \cdot (Q^2 - 1)}$
	$R = \frac{U_{m0} R_0}{U_0 (Q^2 + 1)}$ $C = \frac{U_0 Q}{2\pi U_{m0} f_0 R_0}$ $L = \frac{U_{m0} R_0 Q}{2\pi U_0 f_0 (Q^2 + 1)}$

Рассматриваемая измерительная установка может использоваться для определения параметров не только трехэлементных, но и четырехэлементных резонансных ЭЦ с применением методики, изложенной в [11, 12] на примере

ЭЦ, показанной на рис. 2 (эквивалентная электрическая схема изделий из пьезоматериалов). При этом измеряются следующие частотные параметры ЭЦ: резонансная частота f_0 (частота последовательного резонанса), максимальное напряжение на выходе ИЦ U_{m0} , добротность Q , частота антирезонанса f_1 (частота параллельного резонанса). Для определения четырех электрических параметров ЭЦ составляется и решается система четырех уравнений, связывающих формулы для расчета частотных параметров ЭЦ с их измеренными значениями.

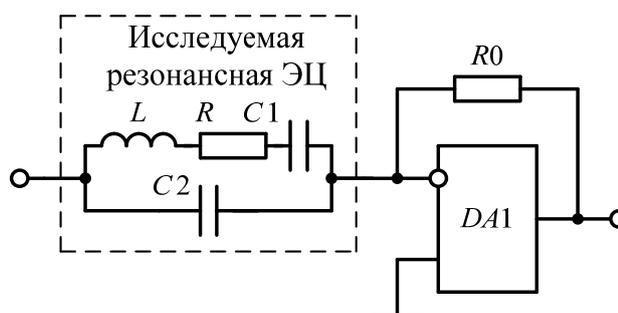


Рис. 2. ИЦ для измерения параметров четырехэлементных резонансных ЭЦ

Экспериментальные исследования блоков разработанной многофункциональной измерительной установки [5, 7, 11, 12] показали возможность определения параметров различных нерезонансных и резонансных ЭЦ, изображенных в табл. 1–3 и на рис. 2, при вариации параметров элементов ЭЦ в установленных диапазонах с относительной погрешностью не более $\pm 2\%$, что сопоставимо с погрешностями специализированных средств измерений параметров ЭЦ конкретных видов.

Заключение

Разработана многофункциональная измерительная установка для определения параметров многоэлементных нерезонансных и резонансных ЭЦ. Приведены расчетные соотношения для определения электрических параметров ряда трех- и четырехэлементных ЭЦ по результатам совокупных измерений, выполняемых с помощью разработанной установки. Достоверность полученных результатов подтверждается экспериментальными исследованиями и схемотехническим моделированием измерительных цепей с помощью программы PSpice.

Список литературы

1. Мартяшин А. И., Шахов Э. К., Шляндин В. М. Преобразователи электрических параметров для систем контроля и измерения. М. : Энергия, 1976. 392 с.
2. Кнеллер В. Ю., Боровских Л. П. Определение параметров многоэлементных двухполюсников. М. : Энергоатомиздат, 1986. 144 с.
3. Светлов А. В., Князьков А. В., Колдов А. С., Родионова Н. В. Совокупные измерения параметров многоэлементных электрических цепей // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 3. С. 69–78.

4. Светлов А. В., Колдов А. С. Методика совокупных измерений параметров резонансных электрических цепей // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сб. ст. по материалам XXXIII Междунар. науч.-техн. конф. (г. Пенза, 22–23 мая 2019 г.) : в 2 т. Пенза : Изд-во ПГУ, 2019. Т. 1. С. 145–149.
5. Светлов А. В., Нгуен Н. М. Совокупные измерения параметров трехэлементных резонансных электрических цепей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2020. № 3. С. 68–77.
6. Светлов А. В., Колдов А. С., Родионова Н. В. Оценивание случайных погрешностей измерительных преобразователей // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 4. С. 76–84.
7. Светлов А. В., Колдов А. С. Оценивание погрешностей определения параметров нерезонансных электрических цепей по результатам совокупных измерений // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2019. № 2. С. 59–68.
8. Светлов А. В., Колдов А. С. Определение параметров нерезонансных четырехэлементных электрических цепей по результатам совокупных измерений // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2019. № 3. С. 39–47.
9. Светлов А. В., Андреев А. Н., Казаков В. А., Светлов Д. А. Определение параметров двухполюсников по значениям дискретных отсчетов выходного напряжения измерительной схемы // Измерительная техника. 1999. № 8. С. 19–22.
10. Светлов А. В., Нгуен Н. М. Определение параметров резонансных электрических цепей по результатам измерений резонансной частоты и добротности // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 3. С. 39–47.
11. Светлов А. В., Нгуен Н. М. Измерение параметров резонансных электрических цепей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 3. С. 83–92.
12. Светлов А. В., Нгуен Н. М. Определение параметров изделий из пьезоматериалов, представляемых резонансными четырехэлементными эквивалентными схемами // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 69–75.

References

1. Martyashin A.I., Shakhov E.K., Shlyandin V.M. *Preobrazovateli elektricheskikh parametrov dlya sistem kontrolya i izmereniya = Electrical parameter converters for control and measurement systems*. Moscow: Energiya, 1976:392. (In Russ.)
2. Kneller V.Yu., Borovskikh L.P. *Opredelenie parametrov mnogoelementnykh dvukhpolyusnikov = Determination of parameters of multi-element two-terminal networks*. Moscow: Energoatomizdat, 1986:144. (In Russ.)
3. Svetlov A.V., Knyaz'kov A.V., Koldov A.S., Rodionova N.V. Aggregate measurements of parameters of multi-element electrical circuits. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2018;(3):69–78. (In Russ.)
4. Svetlov A.V., Koldov A.S. Methodology of aggregate measurements of parameters of resonant electric circuits. *Problemy avtomatizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh: sb. st. po materialam XXXIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (g. Penza, 22–23 maya 2019 g.): v 2 t = Problems of automation and engineering conference (Penza, May 22-23, 2019): in 2 volumes*. Penza: Izd-vo PGU, 2019;1:145–149. (In Russ.)
5. Svetlov A.V., Nguen N.M. Aggregate measurements of parameters of three-element resonant electric circuits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Po-volzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2020;(3):68–77. (In Russ.)
6. Svetlov A.V., Koldov A.S., Rodionova N.V. Evaluation of random errors of measuring transducers. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2018;(4):76–84. (In Russ.)

7. Svetlov A.V., Koldov A.S. Estimation of errors in determining the parameters of non-resonant electrical circuits based on the results of combined measurements. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2019;(2):59–68. (In Russ.)
8. Svetlov A.V., Koldov A.S. Determination of parameters of non-resonant four-element electrical circuits based on the results of combined measurements. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2019;(3):39–47. (In Russ.)
9. Svetlov A.V., Andreev A.N., Kazakov V.A., Svetlov D.A. Determination of the parameters of two-terminal networks based on the values of discrete readings of the output voltage of the measuring circuit. *Izmeritel'naya tekhnika = .* 1999;(8):19–22. (In Russ.)
10. Svetlov A.V., Nguen N.M. Determination of parameters of resonant electric circuits based on the results of measurements of resonant frequency and quality factor. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2021;(3):39–47. (In Russ.)
11. Svetlov A.V., Nguen N.M. Measuring the parameters of resonant electrical circuits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2021;(3):83–92. (In Russ.)
12. Svetlov A.V., Nguen N.M. Determination of parameters of products made of piezoelectric materials represented by resonant four-element equivalent circuits. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2022;(3):69–75. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Анатолий Вильевич Светлов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры радиотехники
и радиоэлектронных систем, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: rtech@pnzgu.ru

Anatoliy V. Svetlov

Doctor of engineering sciences, professor,
professor of the sub-department of radio
engineering and radio electronic system,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Сергеевич Колдов

инженер кафедры радиотехники
и радиоэлектронных систем, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

Aleksandr S. Koldov

Engineer of the sub-department of radio
engineering and radio electronic system,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 11.12.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 13.05.2024

Принята к публикации / Accepted 29.06.2024