

*А. В. Князьков, А. С. Колдов, Н. В. Родионова, А. В. Светлов*

## СОВОКУПНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

*A. V. Knyazkov, A. S. Koldov, N. V. Rodionova, A. V. Svetlov*

## AGGREGATE MEASUREMENTS OF PARAMETERS OF MULTI-ELEMENT ELECTRIC CIRCUITS

**А н н о т а ц и я. Актуальность и цели.** Исследована возможность определения параметров многоэлементных электрических цепей с использованием совокупного метода измерений. **Материалы и методы.** Выполнено математическое моделирование измерительных схем. Оценка случайной погрешности результатов измерений параметров четырехэлементной электрической цепи получена путем моделирования методом Монте-Карло. **Результаты.** Приведены расчетные соотношения для определения параметров элементов четырехэлементной RC-цепи. Даны оценки методической и случайной составляющих погрешностей измерений параметров элементов цепи. Сформулированы требования к средствам получения отсчетов выходного напряжения измерительной схемы в фиксированные моменты времени. **Выводы.** Подтверждена возможность совокупных измерений параметров многоэлементных электрических цепей с погрешностью не более 1 %.

**A b s t r a c t. Background.** The possibility of determining the parameters of multielement electric circuits using the combined measurement method is investigated. **Materials and methods.** Mathematical modeling of measuring circuits is performed. The estimation of a random error in the results of measuring the parameters of a four-element electric circuit was obtained by Monte Carlo simulations. **Results.** The calculated ratios for determining the parameters of the elements of a four-element RC chain. The estimations of the methodical and random components of the errors in measuring the parameters of the circuit elements. Requirements are formulated for means for obtaining samples of the output voltage of the measuring circuit at fixed instants of time. **Conclusions.** The possibility of aggregate measurements of the parameters of multi-element electric circuits with an error of not more than 1 % has been confirmed.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** многоэлементная электрическая цепь, совокупные измерения, оценка погрешностей.

**К e y w o r d s:** multi-element electric circuits, aggregate measurement, error estimation.

Методы и средства измерения параметров электрических цепей применяются при решении множества задач определения параметров и характеристик объектов и процессов в кондуктометрии и диэлькометрии, при измерении давления, перемещения и т.д. с помощью различных параметрических датчиков, при измерении параметров радиоэлементов и полупроводниковых структур. Актуальной задачей является разработка измерителей параметров многоэлементных электрических цепей, поскольку для повышения достоверности описания электрических свойств объектов приходится увеличивать число элементов эквивалентных электрических схем, отображающих поведение объектов в статическом и динамическом режимах [1].

Высоким быстродействием и простотой реализации отличаются преобразователи параметров многоэлементных электрических цепей, основанные на анализе переходного процесса в измерительных схемах (ИС) на операционных усилителях (ОУ) при воздействии на ИС не-

синусоидального напряжения с широким спектром частот [2, 3]. Такие преобразователи обеспечивают приемлемые метрологические характеристики, способны работать в широких диапазонах изменения параметров электрических цепей.

Рассмотрим некоторые известные технические решения, позволяющие измерить параметры элементов четырехэлементных двухполюсных электрических цепей, содержащих параллельно и последовательно включенные резисторы и конденсаторы.

Например, в преобразователе параметров четырехэлементных двухполюсников в напряжение [4] исследуемая четырехэлементная  $RC$ -цепь включается во входной цепи ИС на ОУ, в цепи отрицательной обратной связи ОУ включается образцовый конденсатор. На вход ИС поступает импульсное напряжение прямоугольной формы. Выходное напряжение ИС подвергается ряду последовательных аналоговых преобразований: выборки и хранения в задаваемые моменты времени, вычитания выходных сигналов узлов, дифференцирования, временной селекции на задаваемом интервале времени, интегрирования на этом интервале времени. В результате выполнения этих преобразований на выходах узлов формируются постоянные напряжения, прямо пропорциональные емкостям  $C_1$ ,  $C_2$  и обратно пропорциональные сопротивлениям  $R_1$ ,  $R_2$ .

Отличительной особенностью преобразователя параметров четырехэлементных цепей, описанного в [5], является использование сложных воздействий, получаемых весовым суммированием четырех сигналов:

- исходного линейно изменяющегося сигнала;
- проинтегрированного исходного сигнала;
- проинтегрированного исходного сигнала;
- дважды проинтегрированного исходного сигнала.

С помощью аналоговых ключей выходные сигналы весовых сумматоров подаются в заданные моменты времени на вход ИС на ОУ, во входной цепи которого включена исследуемая четырехэлементная  $RC$ -цепь, а в цепи отрицательной обратной связи – образцовый резистор. С помощью устройств выборки и хранения формируются отсчеты выходных напряжений узлов, пропорциональные значениям параметров исследуемой цепи.

Последовательное выполнение ряда аналоговых преобразований в рассмотренных устройствах требует больших аппаратных затрат, отличается сложностью настройки узлов, приводит к накоплению погрешностей. От названных недостатков можно избавиться, перейдя от аппаратной реализации преобразований сигналов в аналоговой форме к цифровой обработке выходных сигналов ИС с применением соответствующих алгоритмов вычисления искомым параметров исследуемых многоэлементных цепей по значениям дискретных отсчетов выходных напряжений ИС в некоторые характерные моменты времени [6]. При подаче на вход ИС скачка постоянного напряжения выходное напряжение ИС в случаях нерезонансных цепей в общем виде может быть представлено как сумма постоянной составляющей  $A_0$ , линейно изменяющейся составляющей с крутизной  $A_1$ , спадающей экспоненциальной составляющей с начальным значением  $A_2$  и постоянной времени  $\tau$ , возрастающей экспоненциальной составляющей с конечным (установившимся) значением  $A_3$  и постоянной времени  $\tau$ :

$$U(t) = A_0 + A_1 t + A_2 e^{-\frac{t}{\tau}} + A_3 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right). \quad (1)$$

Для определения параметров исследуемой цепи используются отсчеты в начальный момент времени, на экспоненциальном участке переходного процесса, в установившемся режиме. Искомые значения параметров элементов цепи могут быть найдены путем решения системы уравнений, связывающих полученные отсчеты и параметры составляющих выходного напряжения ИС, с учетом функциональных зависимостей между ними и параметрами элементов цепи [7]. Согласно РМГ 29-2013 такой способ измерений можно трактовать как совокупные измерения, т.е. «проводимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величин определяют путем решения системы уравнений, по-

лучаемых при измерениях этих величин в различных сочетаниях, причем число уравнений должно быть не меньше числа искомых величин» [8].

Для решения полученных систем уравнений могут быть использованы специализированные программы, реализующие численные методы решения систем уравнений, или универсальные системы математических расчетов, например, MathCAD. В специализированных приборах для оперативного контроля параметров технологических процессов целесообразно использовать упрощенные алгоритмы вычисления параметров цепей, не требующие решения численными методами систем уравнений. Особенностью упрощенных алгоритмов является то, что к моментам получения последних отсчетов экспоненциальный переходный процесс в ИС считается полностью установившимся. Это позволяет существенно упростить используемые уравнения и получить их решения в общем виде для непосредственного вычисления искомых параметров. Оценка появляющейся за счет такого упрощения методической составляющей погрешности преобразования дана в работе [6].

В качестве примера рассмотрим совокупные измерения параметров изображенных на рис. 1, *a* и *b* четырехэлементных RC-цепей, содержащих параллельно и последовательно включенные резисторы и конденсаторы.

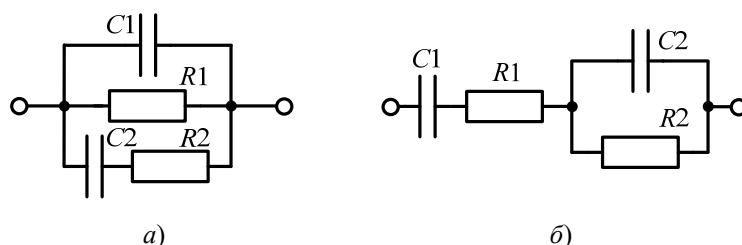


Рис. 1. Четырехэлементные двухполюсные электрические цепи

Цепь вида рис. 1, *a* включается во входной цепи ОУ, образцовый конденсатор  $C_0$  – в цепи отрицательной обратной связи ОУ (рис. 2, *a*). Цепь вида рис. 1, *b* включается в цепи отрицательной обратной связи ОУ, образцовый резистор  $R_0$  – во входной цепи ОУ (рис. 2, *b*).

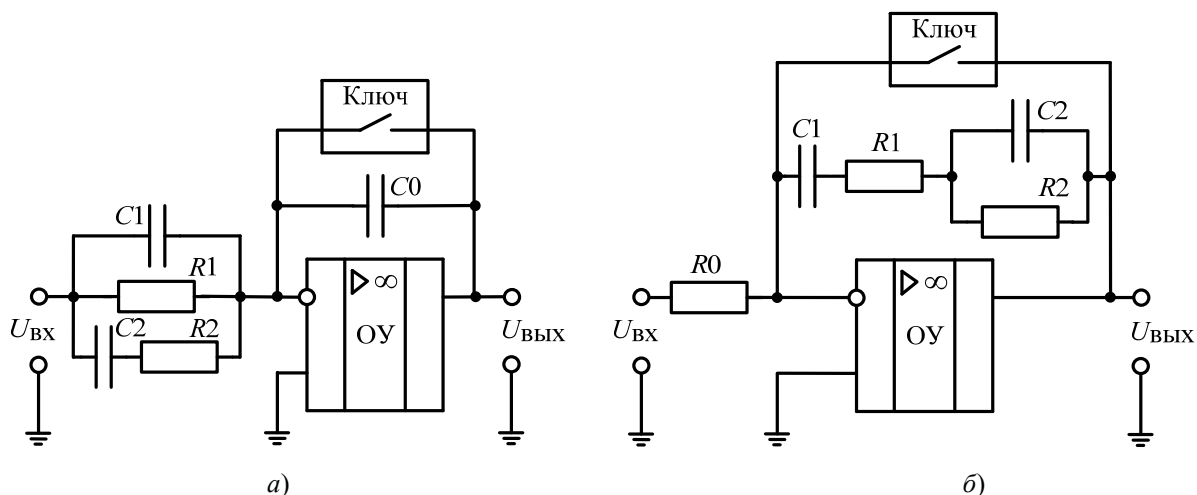


Рис. 2. ИС для определения параметров четырехэлементных электрических цепей

На вход ИС подается периодическая последовательность прямоугольных импульсов отрицательной полярности с амплитудой  $U_0$ . В течение рабочей части периода повторения входного воздействия выходное напряжение ИС рис. 2, *a* описывается выражением

$$U_{\text{вых}}(t) = \frac{U_0 C_1}{C_0} + \frac{U_0}{R_1 C_0} t + \frac{U_0 C_2}{C_0} \left( 1 - e^{-\frac{t}{R_2 C_2}} \right), \quad (2)$$

а выходное напряжение ИС рис. 2б описывается выражением

$$U_{\text{вых}}(t) = \frac{U_0 R_1}{R_0} + \frac{U_0}{R_0 C_1} t + \frac{U_0 R_2}{R_0} \left( 1 - e^{-\frac{t}{R_2 C_2}} \right). \quad (3)$$

Во время паузы замыкается аналоговый ключ в цепи отрицательной обратной связи ОУ, чем предотвращается накопление зарядов на емкости  $C_0$  в схеме рис. 2,а и на емкостях  $C_1$ ,  $C_2$  исследуемой цепи в схеме рис. 2,б. Принудительный разряд емкостей способствует стабилизации режима ОУ по постоянному току, однако в схеме рис. 2,б эта процедура из-за последовательно включенного сопротивления  $R_1$  может потребовать больших затрат времени. В качестве альтернативного технического решения можно использовать двухполярное входное воздействие и фильтр нижних частот вместо аналогового ключа в цепи отрицательной обратной связи ОУ.

Для определения параметров исследуемой цепи берутся отсчеты выходного напряжения ИС в моменты времени:

$t_0$  – начальный момент времени (момент подачи скачка входного напряжения);

$t_1$  – момент времени из интервала, соответствующего наиболее характерному участку экспоненциальной составляющей переходного процесса в ИС:  $4\tau > t_1 > 0,5\tau$  [6];

$t_{1y}$ ,  $t_{2y}$  – моменты времени, соответствующие практическому установлению напряжения  $U_{\text{вых}}(t)$ :  $t_{2y} > t_{1y} > 6\tau$ .

Полученные отсчеты выходного напряжения ИС в моменты времени  $t_0$ ,  $t_1$ ,  $t_{1y}$ ,  $t_{2y}$  используются как исходные данные для составления системы уравнений:

$$\begin{cases} U(t_0) = A_0 + A_1 t_0 + A_3 \left( 1 - e^{-\frac{t_0}{\tau}} \right); \\ U(t_1) = A_0 + A_1 t_1 + A_3 \left( 1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}} \right); \\ U(t_{1y}) = A_0 + A_1 t_{1y} + A_3 \left( 1 - e^{-\frac{t_{1y}}{\tau}} \right); \\ U(t_{2y}) = A_0 + A_1 t_{2y} + A_3 \left( 1 - e^{-\frac{t_{2y}}{\tau}} \right). \end{cases} \quad (4)$$

В результате решения этой системы уравнений определяются параметры составляющих выходного напряжения ИС:  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_3$ ,  $\tau$ . Параметры элементов исследуемой цепи  $C_1$ ,  $R_1$ ,  $C_2$ ,  $R_2$  могут быть найдены с использованием функциональных зависимостей между ними и параметрами составляющих выходного напряжения ИС. Для схемы рис. 2,а:

$$C_1 = \frac{A_0 C_0}{U_0}; R_1 = \frac{U_0}{A_1 C_0}; C_2 = \frac{A_3 C_0}{U_0}; R_2 = \frac{\tau U_0}{A_3 C_0}. \quad (5)$$

Для схемы рис. 2,б:

$$C_1 = \frac{U_0}{A_1 R_0}; R_1 = \frac{A_0 R_0}{U_0}; C_2 = \frac{U_0 \tau}{A_3 R_0}; R_2 = \frac{A_3 R_0}{U_0}. \quad (6)$$

Упрощенный алгоритм вычисления параметров цепи, не требующий применения программы MathCAD для решения численными методами системы уравнений (4), используется в предположении, что к моментам получения последних отсчетов экспоненциальный переходный процесс в ИС может считаться полностью установившимся. Это позволяет получить ана-

литическое решение уравнений (4) для непосредственного вычисления искомых параметров. Кроме того, параметр  $A_0$  находится не путем непосредственного измерения начального значения  $U(t_0)$  выходного напряжения ИС, а путем экстраполяции по значениям этого напряжения, измеренным в другие моменты времени, где в меньшей степени сказывается неидеальность ОУ [7].

Для практической реализации упрощенного алгоритма вычисления параметров исследуемой цепи используются следующие соотношения:

$$A_0 = U(t_{1y}) - A_1 t_{1y} - A_3; \quad (7)$$

$$A_1 = \frac{U(t_{2y}) - U(t_{1y})}{t_{2y} - t_{1y}}; \quad (8)$$

$$A_3 = \frac{[U(t_{1y}) - U(t_1) - A_1(t_{1y} - t_1)]^2}{U(t_{1y}) - U(2t_1) - A_1(t_{1y} - 2t_1)}; \quad (9)$$

$$\tau = \frac{t_1}{\ln \left[ \frac{U(t_{1y}) - U(t_1) - A_1(t_{1y} - t_1)}{U(t_{1y}) - U(2t_1) - A_1(t_{1y} - 2t_1)} \right]}. \quad (10)$$

В качестве примера приведем результаты математического моделирования ИС (см. рис. 2,а) при следующих номинальных значениях параметров:  $C_1 = 3$  нФ;  $R_1 = 150$  кОм;  $C_2 = 6,2$  нФ;  $R_2 = 12$  кОм;  $\tau = 74,4$  мкс;  $C_0 = 17$  нФ;  $U_0 = 5$  В.

На рис. 3 приведена временная диаграмма выходного напряжения ИС.

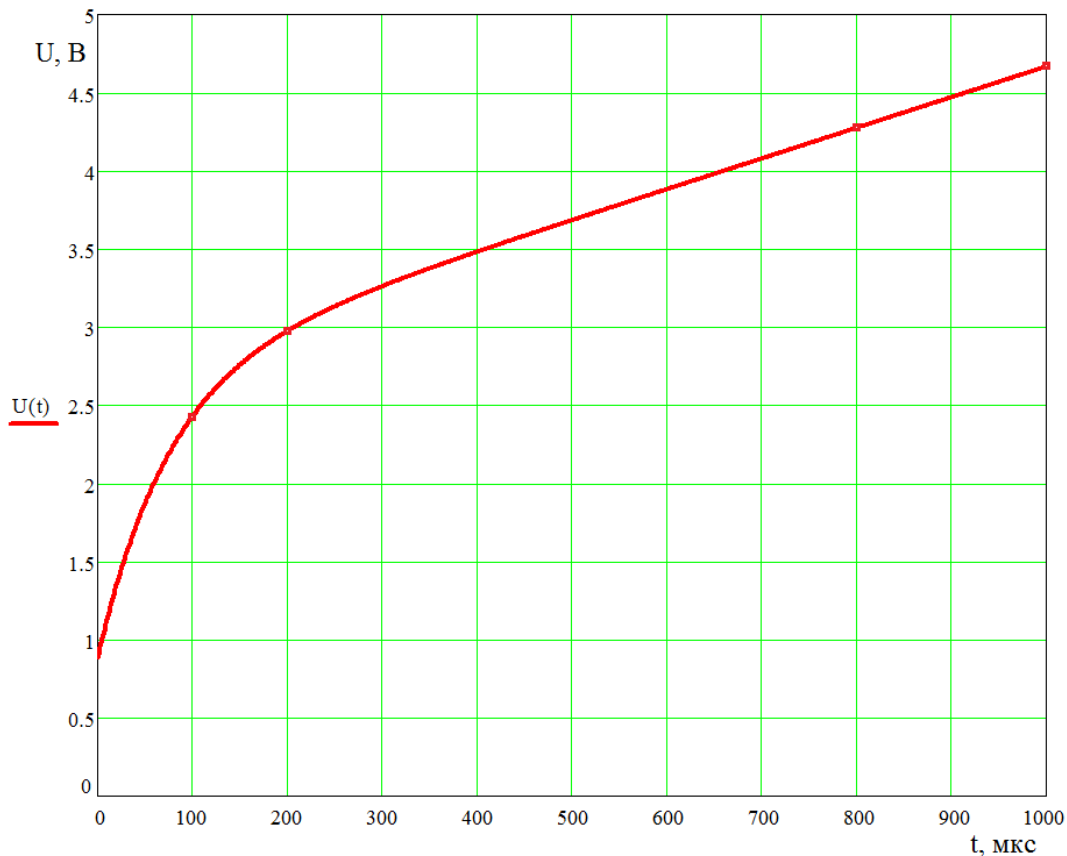


Рис. 3. Временная диаграмма выходного напряжения ИС

Отсчеты выходного напряжения ИС взяты в моменты времени:  $t_1 = 100$  мкс;  $t_2 = 2t_1 = 200$  мкс;  $t_3 = t_{1y} = 800$  мкс;  $t_4 = t_{2y} = 1000$  мкс. Значения отсчетов напряжения:  $U(t_1) = 2,4264$  В;  $U(t_2) = 2,9740$  В;  $U(t_3) = 4,2745$  В;  $U(t_4) = 4,6667$  В. Результаты вычислений параметров составляющих выходного напряжения ИС с использованием упрощенного алгоритма по формулам (7) – (10):  $A_0 = 0,88129$  В;  $A_1 = 1960,95$  В/с;  $A_3 = 1,82442$  В;  $\tau = 74,3554$  мкс. Значения параметров исследуемой цепи, вычисленные по формулам (5):  $C_1 = 2,9964$  нФ;  $R_1 = 149,987$  кОм;  $C_2 = 6,2030$  нФ;  $R_2 = 11,9870$  кОм.

Сравнение полученных значений параметров цепи с их номинальными значениями, приведенными выше, позволяет оценить методическую погрешность, обусловленную применением упрощенных алгоритмов вычисления параметров цепи:  $\delta C_1 = -0,12$  %;  $\delta R_1 = -0,01$  %;  $\delta C_2 = 0,05$  %;  $\delta R_2 = -0,11$  %.

Получение небольшой методической погрешности объясняется тем, что к моментам времени  $t_{1y} = 800$  мкс и  $t_{2y} = 1000$  мкс экспоненциальный переходный процесс с постоянной времени  $\tau = 74,4$  мкс можно считать практически полностью установившимся ( $t_{1y} = 10,8 \tau$ ).

Оценка случайной погрешности результатов измерений параметров четырехэлементной электрической цепи получена путем моделирования в среде MathCAD методом Монте-Карло [9] с построением гистограмм распределения плотности вероятностей случайной погрешности по результатам статистических испытаний. Используются встроенные функции: « $\text{runif}(x1, x2, x3)$ » – для задания равномерного закона распределения плотности вероятности результатов измерений отсчетов напряжения  $U(t_1)$ ,  $U(t_2)$ ,  $U(t_3)$ ,  $U(t_4)$ ; « $\text{stdev}(x)$ » – для вычисления среднего квадратического отклонения (СКО) найденных значений искомых параметров элементов исследуемой цепи  $C_1$ ,  $R_1$ ,  $C_2$ ,  $R_2$ .

В процессе исследований задавались пределы допустимой относительной случайной погрешности результатов измерений отсчетов напряжения от  $\delta U = \pm 0,005$  % до  $\delta U = \pm 0,05$  %. На рис. 4–7 в качестве примера для случая  $\delta U = \pm 0,01$  % приведены:

- гистограммы плотности распределения вероятностей результатов измерений параметров  $C_1$ ,  $R_1$ ,  $C_2$ ,  $R_2$ ;
- значения СКО результатов измерений искомых параметров;
- значения случайной составляющей относительной погрешности.

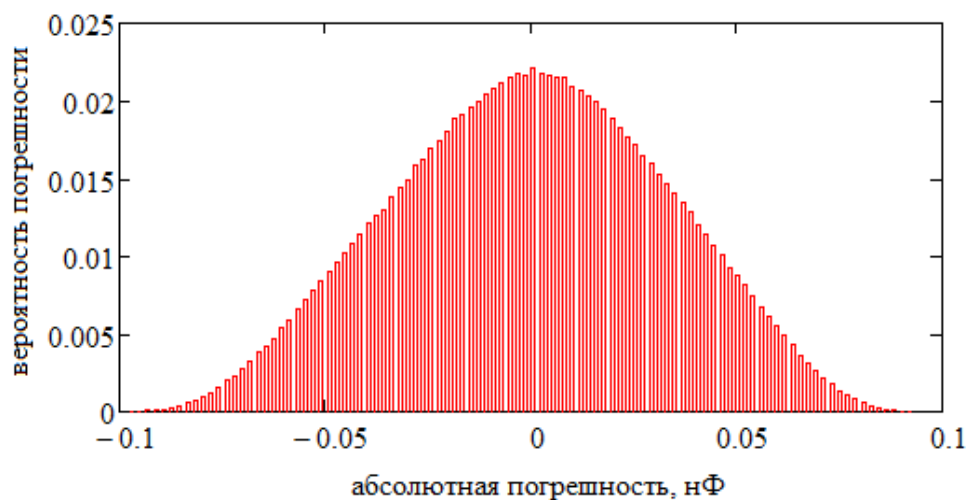


Рис. 4. Гистограмма плотности распределения вероятностей результатов измерений емкости  $C_1$  при погрешности измерения напряжения  $\delta U = \pm 0,01$  %; СКО  $C_1 = 32,84$  пФ; случайная составляющая погрешности  $\delta C_1 = \pm 1,10$  %

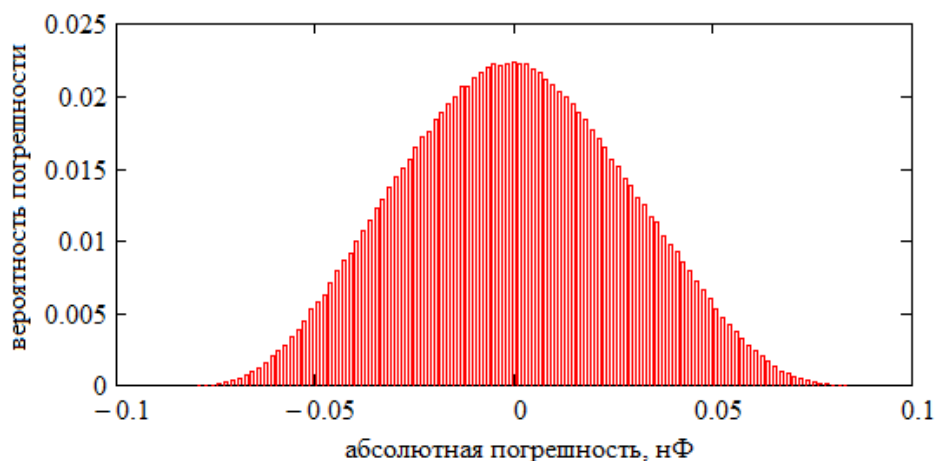


Рис. 5. Гистограмма плотности распределения вероятностей результатов измерений емкости  $C_2$  при погрешности измерения напряжения  $\delta U = \pm 0,01 \%$ ; СКО  $C_2 = 27,55$  пФ; случайная составляющая погрешности  $\delta C_2 = \pm 0,44 \%$

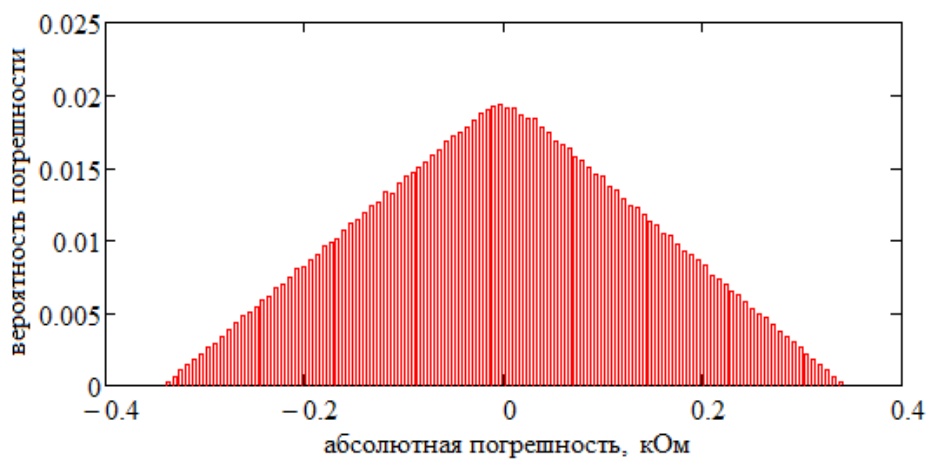


Рис. 6. Гистограмма плотности распределения вероятностей результатов измерений сопротивления  $R_1$  при погрешности измерения напряжения  $\delta U = \pm 0,01 \%$ ; СКО  $R_1 = 139,79$  Ом; случайная составляющая погрешности  $\delta R_1 = \pm 0,09 \%$

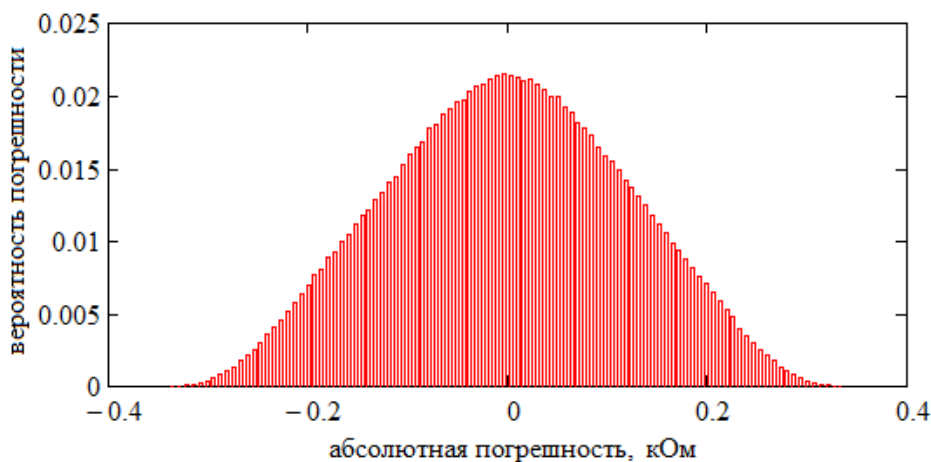


Рис. 7. Гистограмма плотности распределения вероятностей результатов измерений сопротивления  $R_2$  при погрешности измерения напряжения  $\delta U = \pm 0,01 \%$ ; СКО  $R_2 = 118,58$  Ом; случайная составляющая погрешности  $\delta R_2 = \pm 0,99 \%$

Значения случайной составляющей относительной погрешности измерений параметров  $C_1$ ,  $R_1$ ,  $C_2$ ,  $R_2$  при вариации относительной случайной погрешности результатов измерений отсчетов напряжения от  $\delta U = \pm 0,005\%$  до  $\delta U = \pm 0,05\%$  показаны на рис. 8.

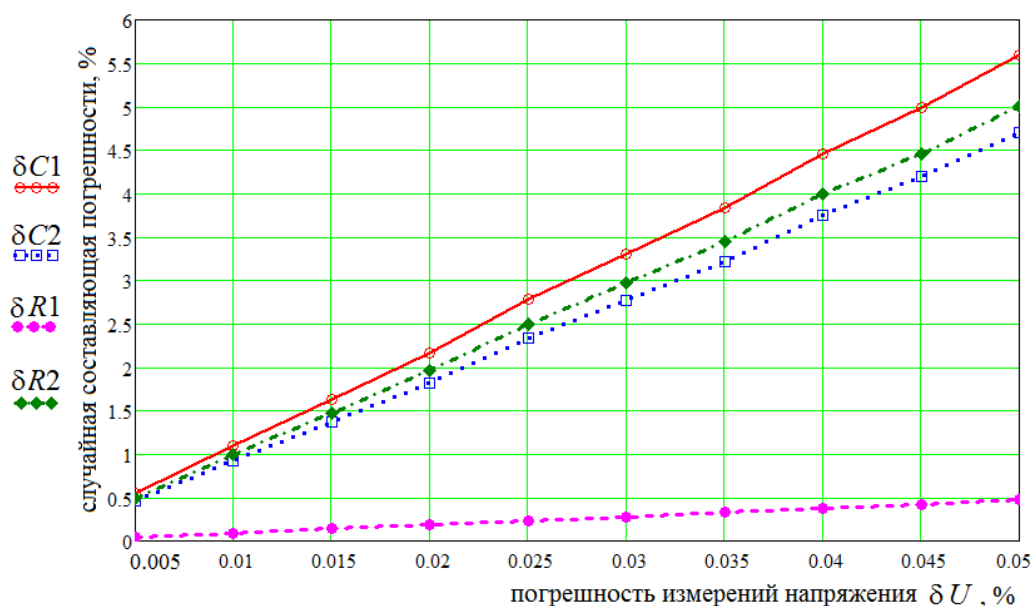


Рис. 8. Графики зависимостей случайных погрешностей измерений параметров цепи от случайной погрешности измерений напряжения

Анализ результатов проведенного исследования показывает, что для получения погрешностей совокупных измерений параметров элементов цепи  $C_1$ ,  $R_1$ ,  $C_2$ ,  $R_2$  не более 1 % необходимо осуществлять измерения отсчетов выходного напряжения ИС с относительной погрешностью  $\delta U$  не более 0,01 %. Следовательно, для измерения отсчетов выходного напряжения ИС требуется многоразрядный (не менее 16 бит) АЦП, например, МСР3424 [10]. На входе АЦП должно быть включено быстродействующее устройство выборки и хранения (УВХ), например, AD781 [11]. УВХ должно запоминать текущее значение входного напряжения по заднему фронту управляющего импульса и хранить его до следующего отсчета в такой же момент времени в следующем периоде входного воздействия. Для получения четырех отсчетов выходного напряжения ИС в указанные выше моменты времени необходимы четыре УВХ. Регистрация выходных напряжений УВХ может осуществляться поочередно одним АЦП с коммутатором либо четырьмя АЦП, постоянно подключенными к «своим» УВХ. Последний вариант предпочтительнее, поскольку при этом не добавляется дополнительная составляющая погрешности, обусловленная неидеальностью коммутатора и паразитными параметрами соединительных проводников.

Экспериментальные исследования измерителя показали приемлемую сходимость результатов эксперимента с результатами математического моделирования.

### Заключение

Измерение параметров многоэлементных электрических цепей совокупным методом позволяет получить хорошие результаты по точности. Рассмотренный в статье подход к оценке случайных погрешностей совокупных измерений параметров многоэлементных электрических цепей позволяет сформулировать требования к средствам получения отсчетов выходного напряжения измерительной схемы в фиксированные моменты времени.

### Библиографический список

1. Кнеллер, В. Ю. Измерение параметров объектов, представляемых многоэлементными двухполюсниками / В. Ю. Кнеллер, Л. П. Боровских // Измерения, контроль, автоматизация. – 1976. – Вып. 3 (7). – С. 3–11.



2. *Мартяшин, А. И.* Основы инвариантного преобразования параметров электрических цепей / А. И. Мартяшин, К. Л. Куликовский, С. К. Куроедов, Л. В. Орлова ; под ред. А. И. Мартяшина. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 216 с.
3. *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 ПГУ, 2003. – Т. 2. – С. 288–290.
4. А. с. 938199 СССР. Преобразователь параметров четырехэлементных двухполюсников в напряжение / А. И. Мартяшин, В. М. Чайковский, П. П. Чураков // Открытия. Изобретения. – 1982. – № 23. – С. 237.
5. *Кулапин, В. И.* Синтез измерительного преобразователя для измерения проводимости кондуктометрического датчика / В. И. Кулапин, А. С. Колдов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 1. – С. 250–251.
6. *Светлов, А. В.* Определение параметров двухполюсников по значениям дискретных отсчетов выходного напряжения измерительной схемы / А. В. Светлов, В. А. Казаков, Э. К. Шахов, Д. А. Светлов // Измерительная техника. – 1999. – № 8. – С. 19–22.
7. *Светлов, А. В.* Принципы построения преобразователей параметров многоэлементных двухполюсных электрических цепей / А. В. Светлов. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 1999. – 144 с.
8. РМГ 29-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения.
9. *Баранов, В. А.* Оценивание погрешностей измерений параметров комплексного сопротивления методом Монте-Карло / В. А. Баранов, А. А. Данилов, С. А. Шумарова // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5. – URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/-view?id=10205>
10. MCP3422/3/4. 18-Bit, Multi-Channel  $\Delta\Sigma$  Analog-to-Digital Converter with I<sup>2</sup>C<sup>TM</sup> Interface and On-Board Reference. – Microchip Technology Inc. – URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22088c.pdf>
11. AD781. Complete 700 ns Sample-and-Hold Amplifier. – Analog Devices, Inc., 2004. – URL: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD781.pdf>

**Князьков Александр Владимирович**

инженер,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: [rtech@pnzgu.ru](mailto:rtech@pnzgu.ru)

**Knyazkov Aleksandr Vladimirovich**

engineer,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Колдов Александр Сергеевич**

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

**Koldov Aleksandr Sergeevich**

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

**Родионова Нина Владимировна**

аспирант,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: [rtech@pnzgu.ru](mailto:rtech@pnzgu.ru)

**Rodionova Nina Vladimirovna**

postgraduate student,  
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](mailto: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)

УДК 621.317.73

**Князьков, 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. – DOI 10.21685/2307-5538-2018-3-9.**