

ОЦЕНИВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕРЕЗОНАНСНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СОВОКУПНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Аннотация.

Актуальность и цели. Разработана методика оценивания погрешностей определения параметров нерезонансных многоэлементных электрических цепей по результатам совокупных измерений.

Материалы и методы. Указаны причины появления систематических (методических и инструментальных), а также случайных погрешностей определения параметров нерезонансных многоэлементных электрических цепей. Анализ погрешностей при поочередной вариации в установленных диапазонах номинальных значений параметров всех элементов цепей позволяет определить диапазоны допустимых соотношений измеряемых параметров элементов цепей.

Результаты. Показаны этапы методики и даны расчетные соотношения для оценивания погрешностей определения параметров цепей. Предложенная методика применена для оценивания погрешностей определения параметров каждого из элементов нерезонансной четырехэлементной цепи при вариации номинальных значений параметров всех элементов цепи в заданных диапазонах.

Выводы. На практическом примере четырехэлементной цепи подтверждена возможность применения предложенной методики для оценивания погрешностей определения параметров каждого из элементов цепи.

Ключевые слова: нерезонансная электрическая цепь, совокупные измерения, погрешности определения параметров цепи.

ERROR ESTIMATE OF DETERMINING NON-RESONANT FOUR-ELEMENT CIRCUIT PARAMETERS USING THE AGGREGATE MEASUREMENTS METHOD

Abstract.

Background. The authors have developed an error estimating technique when determining the parameters of non-resonant multi-element circuits using the results of aggregate measurements.

Materials and methods. Causes of systematic (methodical and instrumental) and random errors of determining the parameters of non-resonant multi-element circuits are given. Error analysis with one-by-one variations of all circuit element parameters in fixed ranges of nominal values allows to determine ranges for permissible ratios of measurable circuit element parameters.

Results. The work shown steps of the technique and presents calculated ratios for estimating errors of determining the circuit parameters. The proposed method is ap-

plied for estimating errors when determining the parameters of non-resonant four-element circuit with variation of all circuit element parameters in fixed ranges.

Conclusions. The possibility of applying the proposed methodology for estimating errors when determining the parameters of every circuit elements is confirmed on a practical example.

Keywords: non-resonant circuit, aggregate measurements, errors of determining of circuit parameters

Введение

Одним из важных разделов измерительной техники является разработка средств измерений параметров нерезонансных многоэлементных электрических цепей (ЭЦ) [1–3]. Измерительные преобразователи параметров таких ЭЦ отличаются сложностью аппаратной части, необходимостью последовательного выполнения нескольких аналоговых преобразований выходного напряжения измерительной цепи (ИЦ) для получения сигналов, пропорциональных искомым параметрам элементов ЭЦ, что способствует увеличению случайной погрешности измерений [4]. Существенно упростить аппаратную часть измерительных преобразователей позволяет переход от аналоговых преобразований измеряемых величин к цифровой обработке выходных сигналов ИЦ с использованием метода совокупных измерений [5]. ИЦ осуществляет преобразование сопротивления исследуемой ЭЦ в напряжение. С помощью быстродействующих устройств выборки и хранения (УВХ) берутся отсчеты этого напряжения в характерные моменты времени переходного процесса в ИЦ после подачи импульсного тестового воздействия. Выходные напряжения УВХ преобразуются в коды с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Все дальнейшие преобразования информации о параметрах элементов ЭЦ выполняются на программном уровне с использованием метода совокупных измерений, когда искомые значения параметров элементов ЭЦ определяются путем решения системы, составленной из уравнений вида

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

представляющих выходное напряжение ИЦ в виде суммы постоянной составляющей A_0 , линейно изменяющейся составляющей с крутизной A_1 , спадающей экспоненциальной составляющей с начальным значением A_2 и возрастающей экспоненциальной составляющей с конечным (установившимся) значением A_3 и постоянной времени τ .

Число уравнений, входящих в систему, равно числу отсчетов напряжения и, соответственно, равно числу элементов ЭЦ. Например, при измерении параметров четырехэлементных ЭЦ 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. Система уравнений связывает измеренные значения отсчетов выходного напряжения ИЦ $U(t_1)$, $U(t_2)$, $U(t_{1y})$, $U(t_{2y})$ и параметры составляющих этого напряжения A_0 , A_1 , A_2 , A_3 , τ , функционально связанных с искомыми параметрами элементов ЭЦ.

Данная статья посвящена разработке методики оценивания погрешностей определения параметров нерезонансных многоэлементных ЭЦ по результатам совокупных измерений.

1. Причины появления систематических и случайных погрешностей определения параметров нерезонансных ЭЦ

Методические погрешности средств определения параметров многоэлементных ЭЦ по результатам совокупных измерений обусловлены следующими факторами:

– неточное представление исследуемых объектов эквивалентными электрическими схемами;

– определение начального значения выходного напряжения ИЦ (1) путем экстраполяции по значениям этого напряжения, измеренным в другие моменты времени, в условиях искажения функциональной зависимости между сопротивлением ЭЦ и выходным напряжением ИЦ из-за паразитных параметров операционного усилителя (ОУ), платы, подводящих проводников;

– использование упрощенных аналитических решений систем уравнений в обобщенных A -параметрах для отсчетов выходных напряжений ИЦ, полученных в условиях неполного завершения переходного процесса в ИЦ, при неполном установлении экспоненциального напряжения.

В данной работе оценивается влияние последнего из упомянутых факторов путем сравнения упрощенных аналитических решений систем уравнений относительно A -параметров и истинных значений этих параметров.

Инструментальные погрешности средств определения параметров многоэлементных ЭЦ по результатам совокупных измерений обусловлены неидеальностью элементной базы узлов аппаратной части этих средств:

– измерительной цепи, осуществляющей преобразование сопротивления электрической цепи в напряжение;

– формирователя входного воздействия, вызывающего такой переходный процесс в ИЦ, при котором параметры постоянной, линейно изменяющейся и экспоненциально изменяющейся составляющих выходного напряжения ИЦ связаны простыми функциональными зависимостями с параметрами исследуемой электрической цепи;

– устройства выборки и хранения напряжения, осуществляющего получение и хранение отсчетов выходного напряжения ИЦ в заданные характерные моменты времени;

– аналого-цифрового преобразователя, осуществляющего оцифровку выходного напряжения УВХ.

Причинами появления случайных погрешностей определения параметров многоэлементных ЭЦ могут быть: собственные шумы пассивных и активных элементов, нестабильность их параметров (например, напряжения смещения операционных усилителей), пульсации питающих напряжений, наводки по цепям питания и общей шине и др.

2. Методика оценивания погрешностей определения параметров нерезонансных ЭЦ по результатам совокупных измерений

Наиболее высокая достоверность оценивания погрешностей средств измерений параметров ЭЦ может быть получена при проведении полномас-

штабных экспериментальных исследований, требующих больших временных и материальных затрат. Поэтому оправдывает себя практика проведения основного объема исследований путем математического моделирования, результаты которого на завершающей стадии проверяются экспериментально.

Для математического моделирования ИЦ требуется модель ОУ, учитывающая реальные значения его коэффициента усиления, входного и выходного сопротивлений, максимальной скорости нарастания выходного напряжения, частоты единичного усиления и т.д. Аналитическое описание выходного напряжения ОУ возможно при учете только одного-двух из перечисленных параметров. При попытке одновременного учета нескольких параметров, характеризующих неидеальность ОУ, получаются настолько громоздкие выражения, что они становятся непригодными для моделирования простейшего инвертирующего усилителя, не говоря уже о ИЦ измерителя параметров многоэлементных цепей, тем более с учетом влияния паразитных параметров платы и вспомогательных цепей обеспечения режима ОУ по постоянному току.

Возможность одновременного учета множества факторов, характеризующих неидеальность ОУ, появляется при переходе от аналитического описания свойств ОУ к схемотехническому моделированию с использованием программ PSpice [6], Multisim [7] и им подобных, а также макромоделей ОУ, создаваемых с учетом более десятка факторов, определяющих отличие реальных параметров ОУ от параметров идеальных усилителей [8].

Методика оценивания погрешностей определения параметров нерезонансных многоэлементных ЭЦ по результатам совокупных измерений предусматривает следующие этапы:

1. Сравнение упрощенных аналитических решений систем уравнений относительно A -параметров и истинных значений этих параметров позволяет оценивать методические погрешности определения A -параметров:

$$\delta A_i = \frac{A_{i \text{ упрощ}} - A_i}{A_i} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где $A_{i \text{ упрощ}}$ – значение i -го обобщенного A -параметра, найденное как упрощенное аналитическое решение систем, составленных из уравнений вида (1); A_i – истинное значение i -го параметра.

В результате анализа зависимости δA_i от выбора моментов времени получения отсчетов выходного напряжения ИЦ сформулированы обоснованные рекомендации по выбору моментов отсчетов с учетом постоянной времени экспоненциальной составляющей выходного напряжения ИЦ τ : $1,5\tau \geq t_1 \geq 0,5\tau$; $t_2 = 2t_1$; $t_{1y} \geq 8\tau$; $t_{2y} - t_{1y} \geq 2\tau$.

2. Создание модели реального входного импульсного напряжения с учетом длительности фронта импульсов [9] позволяет проводить исследование ИЦ во временной области.

3. Создание модели ИЦ с реальной передаточной функцией с учетом неидеальности ОУ, а также с учетом влияния вспомогательных цепей обеспечения режима ОУ по постоянному току (аналоговый ключ или фильтр нижних частот в цепи отрицательной обратной связи), позволяет в результате

моделирования ИЦ с реальным входным напряжением получить выходное напряжение модели ИЦ с реальной передаточной функцией $U_{\text{ВЫХ.МОД}}(t)$.

4. Создание модели ИЦ с номинальной передаточной функцией в предположении идеальности ОУ позволяет в результате моделирования получить выходное напряжение модели ИЦ с номинальной передаточной функцией $U_{\text{ВЫХ.НОМ}}(t)$.

5. Сравнение выходных напряжений моделей ИЦ с реальной и номинальной передаточными функциями позволяет оценивать погрешность преобразования сопротивления ЭЦ в напряжение:

$$\delta U_{\text{ВЫХ.МОД}}(t) = \frac{U_{\text{ВЫХ.МОД}}(t) - U_{\text{ВЫХ.НОМ}}(t)}{U_{\text{ВЫХ.НОМ}}(t)} \cdot 100 \% . \quad (3)$$

В результате анализа зависимости погрешности $\delta U_{\text{ВЫХ.МОД}}(t)$ от времени можно оптимизировать режимы работы ИЦ путем подбора ОУ, параметров опорных элементов и параметров вспомогательных цепей.

6. Определение искомых параметров каждого i -го элемента ЭЦ $X_{i \text{ mod}}$ и $X_{i \text{ ном}}$ по значениям дискретных отсчетов выходных напряжений моделей ИЦ с реальной $U_{\text{ВЫХ.МОД}}(t)$ и номинальной $U_{\text{ВЫХ.НОМ}}(t)$ передаточными функциями может быть реализовано:

– путем решения численными методами систем уравнений – определяются параметры $X_{i \text{ mod}}^s$ (s – верхний индекс);

– путем нахождения упрощенных аналитических решений систем уравнений в обобщенных A -параметрах для отсчетов выходных напряжений ИЦ – определяются параметры $X_{i \text{ mod}}^u$ и $X_{i \text{ ном}}^m$ (u, m – верхние индексы).

7. Сопоставление полученных значений искомых параметров с действительными значениями X_i параметров ЭЦ позволяет определить:

– методическую погрешность определения искомых параметров элементов ЭЦ путем нахождения упрощенных аналитических решений систем уравнений для отсчетов выходных напряжений модели ИЦ с номинальной передаточной функцией:

$$\delta X_{i \text{ ном}}^m = \frac{X_{i \text{ ном}}^m - X_i}{X_i} \cdot 100 \% ; \quad (4)$$

– инструментальную погрешность определения искомых параметров элементов ЭЦ путем решения численными методами систем уравнений для отсчетов выходных напряжений модели ИЦ с реальной передаточной функцией:

$$\delta X_{i \text{ mod}}^s = \frac{X_{i \text{ mod}}^s - X_i}{X_i} \cdot 100 \% ; \quad (5)$$

– результирующую погрешность определения искомых параметров элементов ЭЦ путем нахождения упрощенных аналитических решений

систем уравнений для отсчетов выходных напряжений модели ИЦ с реальной передаточной функцией:

$$\delta X_{i \text{ mod}}^u = \frac{X_{i \text{ mod}}^u - X_i}{X_i} \cdot 100 \% . \quad (6)$$

Результирующая погрешность $\delta X_{i \text{ mod}}^u$ учитывает и методическую, и инструментальную погрешности определения искомых параметров элементов ЭЦ.

8. Анализ погрешности определения параметра каждого элемента ЭЦ при поочередной вариации в установленных диапазонах номинальных значений параметров всех элементов ЭЦ позволяет определить диапазоны допустимых соотношений измеряемых параметров элементов ЭЦ.

9. Оценивание случайных погрешностей результатов совокупных измерений параметров многоэлементных ЭЦ методом Монте-Карло позволяет сформулировать обоснованные рекомендации по выбору средств получения отсчетов выходного напряжения ИЦ в фиксированные моменты времени.

10. Оценивание сходимости результатов экспериментальных исследований измерителей параметров нерезонансных многоэлементных ЭЦ с результатами математического моделирования позволяет подтвердить корректность предложенной методики совокупных измерений параметров ЭЦ и используемых расчетных соотношений.

Практическая реализация предложенной методики рассмотрена на примере четырехэлементной ЭЦ, показанной в табл. 1 [9].

Таблица 1

$\left\{ \begin{array}{l} U(t_1) = A_0 + A_1 \cdot t_1 + A_3 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}\right); \\ U(t_2) = A_0 + A_1 \cdot t_2 + A_3 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_2}{\tau}}\right); \\ U(t_{1y}) = A_0 + A_1 \cdot t_{1y} + A_3 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{1y}}{\tau}}\right); \\ U(t_{2y}) = A_0 + A_1 \cdot t_{2y} + A_3 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{2y}}{\tau}}\right) \end{array} \right.$	$\begin{array}{l} C_1 = \frac{A_0 C_0}{U_0}; \\ C_2 = \frac{A_3 C_0}{U_0}; \\ R_1 = \frac{U_0}{A_1 C_0}; \\ R_2 = \frac{\tau U_0}{A_3 C_0} \end{array}$

В таблице 1 приведены: схема ИЦ; вид тестового импульсного сигнала; характер сопротивления опорного элемента; вид системы уравнений для

выходных напряжений ИЦ в обобщенных A -параметрах; соотношения для вычисления искомых параметров элементов ЭЦ по найденным A -параметрам.

Номинальные значения 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; ОУ типа 544УД2. Стабилизация режима ОУ по постоянному току осуществляется с помощью аналогового ключа ADG736 в цепи отрицательной обратной связи ИЦ (на схеме не показано).

По результатам схемотехнического моделирования ИЦ в среде PSpice определены методические, инструментальные и результирующие погрешности определения искомых параметров каждого из элементов ЭЦ при вариации номинальных значений параметров в следующих диапазонах: $C1n$ от 1 до 10 нФ; $R1n$ от 50 до 500 кОм; $C2n$ от 3 до 14 нФ; $R2n$ от 8 до 24 кОм. В качестве примера на рис. 1 приведен один из полученных графиков зависимостей погрешностей определения одного из параметров в диапазоне номинальных значений другого параметра.

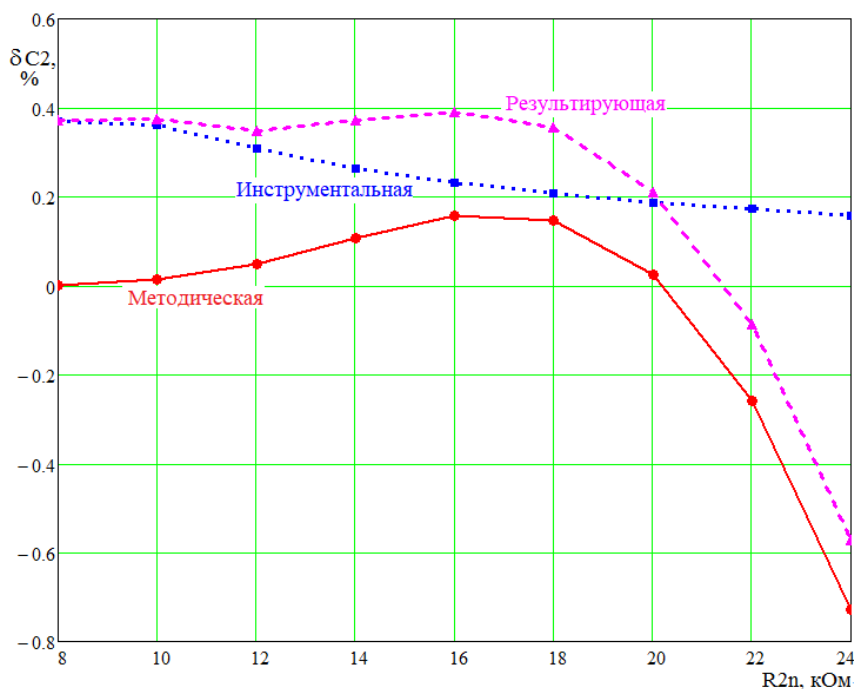


Рис. 1. Графики погрешностей определения параметра C_2 в диапазоне номинальных значений параметра R_2

Полученная информация может использоваться для определения границ диапазонов значений измеряемых параметров элементов ЭЦ, исходя из установленных пределов допустимой погрешности измерений.

Анализ случайных погрешностей результатов совокупных измерений параметров многоэлементных ЭЦ позволяет сформулировать обоснованные рекомендации по выбору средств получения отсчетов выходного напряжения ИЦ. В качестве примера на рис. 2 приведена оценка случайной погрешности измерений параметров рассмотренной выше четырехэлементной ЭЦ при

вариации относительной случайной погрешности результатов измерений отсчетов напряжения от $\delta U = \pm 0,005\%$ до $\delta U = \pm 0,05\%$.

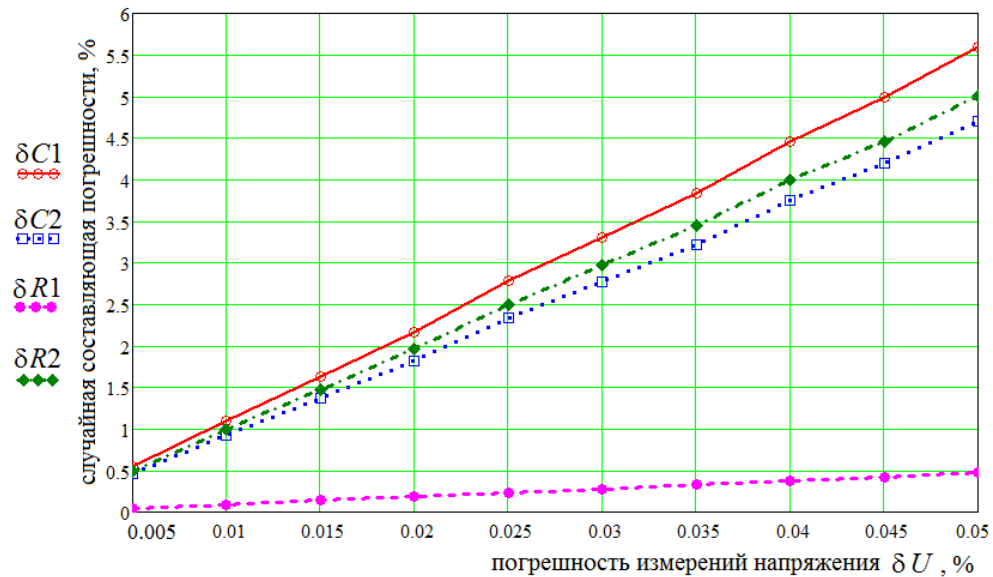


Рис. 2. Графики зависимостей случайных погрешностей измерений параметров ЭЦ от случайной погрешности измерений отсчетов напряжения

Из графиков на рис. 2 видно, что для получения случайных погрешностей совокупных измерений параметров элементов цепи не более 1 % необходимо осуществлять измерения отсчетов выходного напряжения ИС с относительной погрешностью не более 0,01 %, для этого требуется многоразрядный (не менее 16 бит) АЦП, например, МСР3424. На входе АЦП должно быть включено быстродействующее УВХ, например AD781, запоминающее текущее значение входного напряжения ИЦ и хранящее его до следующего отсчета в такой же момент времени в следующем периоде входного воздействия [10]. Использование периодической последовательности импульсов на входе ИЦ и усреднение получаемых отсчетов ее выходного напряжения за множество циклов способствует снижению результирующей погрешности измерений.

Для уменьшения дополнительных, в частности температурных, погрешностей могут применяться известные технические решения [11].

Заключение

Подтверждена возможность применения предложенной методики для оценивания погрешностей определения параметров каждого из элементов нерезонансных многоэлементных ЭЦ.

Библиографический список

1. **Кнеллер, В. Ю.** Определение параметров многоэлементных двухполюсников / В. Ю. Кнеллер, Л. П. Боровских. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
2. **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.

3. **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.
4. **Колдов, А. С.** Оценивание случайных погрешностей измерительных преобразователей / А. С. Колдов, Н. В. Родионова, А. В. Светлов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 4 (26). – С. 76–84.
5. **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.
6. PSpice® User's Guide. includes PSpice A/D, PSpice A/D Basics, and PSpice. – Cadence. Product Version 15.7. – July 2006. – URL: <http://ecee.colorado.edu/~ecen4827/spice/pspice/pspug.pdf>.
7. **Хернитер, М. Е.** Электронное моделирование в Multisim / М. Е. Хернитер. – Москва : ДМК Пресс, 2010. – 488 с.
8. OrCAD Model Editor 9.1 webupdate1. – 2017. – URL: <https://software.-com/windows/apps/orcad-model-editor>.
9. **Колдов, А. С.** Оценка погрешностей совокупных измерений параметров многоэлементных электрических цепей / А. С. Колдов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 2. – С. 71–74.
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.
11. **Арбузов, В. П.** Коррекция температурной погрешности емкостных датчиков давления / В. П. Арбузов, М. А. Мишина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 3 (43). – С. 94–105.

References

1. Kneller V. Yu., Borovskikh L. P. *Opredelenie parametrov mnogoelementnykh dvukhpolyusnikov* [Determination of parameters of multielement two-terminal circuits]. Moscow: Energoatomizdat, 1986, 144 p. [In Russian]
2. Martyashin A. I., Kulikovskiy K. L., Kuroedov S. K., Orlova L. V. *Osnovy invariantnogo preobrazovaniya parametrov elektricheskikh tsepey* [Foundations of invariant transformation of electric circuit parameters]. Moscow: Energoatomizdat, 1990, 216 p. [In Russian]
3. Koldov A. S., Kulapin V. I. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of an International symposium Reliability and Quality]. 2017, vol. 1, pp. 250–251. [In Russian]
4. 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]
5. 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]
6. *PSpice® User's Guide. includes PSpice A/D, PSpice A/D Basics, and PSpice*. Cadence. Product Version 15.7. July 2006. Available at: <http://ecee.colorado.edu/~ecen4827/spice/pspice/pspug.pdf>.
7. Kherniter M. E. *Elektronnoe modelirovanie v Multisim* [Electronic simulation in Multisim]. Moscow: DMK Press, 2010, 488 p. [In Russian]
8. *OrCAD Model Editor 9.1 webupdate1*. 2017. Available at: <https://software.-com/windows/apps/orcad-model-editor>.
9. Koldov A. S. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of an International symposium Reliability and Quality]. 2018, vol. 2, pp. 71–74. [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]
11. Arbuzov V. P., Mishina M. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2017, no. 3 (43), pp. 94–105. [In Russian]

Колдов Александр Сергеевич

старший преподаватель, кафедра радиотехники и радиоэлектронных систем, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: 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)

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

Образец цитирования:

Колдов, А. С. Оценивание погрешностей определения параметров нерезонансных электрических цепей по результатам совокупных измерений / А. С. Колдов, А. В. Светлов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 2 (50). – С. 59–68. – DOI 10.21685/2072-3059-2019-2-6.