

УДК 621.317.33

СИНТЕЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВУХПОЛЮСНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПО МГНОВЕННЫМ ЗНАЧЕНИЯМ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ *

В.С. Мелентьев, Е.В. Костенко, Т.С. Евстифеева, К.Д. Левина

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: vs_mel@mail.ru

Рассматривается классификация методов измерения параметров двухполюсных электрических цепей по мгновенным значениям переходных процессов. Методы классифицируются по следующим основным признакам: количество неизвестных параметров двухполюсника (один, два и более двух параметров); по принципу построения измерительной цепи (количество образцовых резисторов, использование вспомогательных цепей с известными или неизвестными реактивными элементами); по параметрам измерительного процесса (наличие или отсутствие связи с моментом подключения напряжения к измерительной цепи, количество образцовых интервалов времени, количество переходных процессов в измерительной цепи). В результате все методы разделены на шесть групп. Предлагается новый подход к синтезу таких методов. Рассматриваются по одному методу из каждой группы, синтезированных на основе данного подхода.

Ключевые слова: *двухполюсные электрические цепи, переходные процессы, мгновенные значения, измерительная цепь, постоянная времени.*

Введение

Емкостные, индуктивные преобразователи и преобразователи сопротивлений относятся к числу наиболее часто используемых в информационно-измерительной технике при построении первичных измерительных преобразователей. В связи с этим задачи преобразования параметров датчиков – сопротивления, индуктивности и емкости – в различные виды унифицированных сигналов имеют большое значение.

В реальных условиях при преобразовании указанных параметров часто приходится иметь дело не с отдельными элементами, а с двухполюсной электрической цепью (ДЭЦ), схема замещения которой содержит не только элемент, параметр которого подлежит преобразованию, но и ряд других элементов, параметры которых в подобных случаях обычно называют паразитными.

В настоящее время получили развитие методы [1], основанные на определе-

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 13-08-00173-а).

Владимир Сергеевич Мелентьев (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Информационно-измерительная техника».

Елена Валерьевна Костенко, аспирант.

Татьяна Сергеевна Евстифеева, аспирант.

Ксения Дмитриевна Левина, студент факультета автоматики и информационных технологий.

нии параметров ДЭЦ по мгновенным значениям переходных процессов, возникающих при подключении к измерительной цепи (ИЦ) напряжения постоянного тока. За счет обработки мгновенных значений успешно решается задача сокращения времени измерения. К достоинствам таких методов можно также отнести простоту реализации: при определении параметров ДЭЦ используется аналого-цифровое преобразование мгновенных значений сигналов с последующей обработкой кодов.

В статье приводится классификация и синтезируются методы измерения параметров ДЭЦ по мгновенным значениям переходных процессов.

Принципы классификации методов измерения параметров ДЭЦ по мгновенным значениям переходных процессов

Предлагается классифицировать методы измерения параметров двухполюсных электрических цепей по следующим основным признакам: количество неизвестных параметров ДЭЦ (один, два и более двух параметров); по принципу построения измерительной цепи (количество образцовых резисторов, использование вспомогательных цепей с известными или неизвестными реактивными элементами); по параметрам измерительного процесса (наличие или отсутствие связи с моментом подключения напряжения к ИЦ, количество образцовых интервалов времени, количество переходных процессов в ИЦ).

Разработанная классификация представлена на рис. 1.



Рис. 1. Классификация методов измерения параметров ДЭЦ по мгновенным значениям переходных процессов

Исключая противоположные операции: связь или отсутствие связи с моментом подключения напряжения к ИЦ; использование вспомогательных цепей с известными или неизвестными реактивными элементами, а также учитывая, что при измерении ДЭЦ с двумя и более неизвестными параметрами использование вспомогательных ИЦ с реактивными элементами практически невозможно, можно условно выделить шесть групп, характеризующих принципы синтеза методов.

Первую группу составляют методы измерения одного неизвестного параметра ДЭЦ с использованием одного переходного процесса в ИЦ. Учитывая, что в данных методах используется только один образцовый резистор, для этой группы можно синтезировать методы: *AEIMQ*; *AEJMQ*; *AEINQ*; *AEJNQ*; *AEIPQ*; *AEJPQ*.

Вторую группу составляют методы измерения одного неизвестного параметра с использованием двух переходных процессов. Для этой группы можно синтезировать следующие методы: *AEIMS*; *AEJMS*; *AEINS*; *AEJNS*; *AEIPS*; *AEJPS*; *AFIMS*; *AFJMS*; *AFINS*; *AFJNS*; *AFIPS*; *AFJPS*.

К третьей группе можно отнести методы измерения одного неизвестного параметра ДЭЦ с использованием вспомогательных ИЦ с реактивными элементами. С учетом того, что для реализации данных методов всегда используются два переходных процесса, могут быть синтезированы следующие методы: *AGIMS*; *AGJMS*; *AGINS*; *AGJNS*; *AGIPS*; *AGJPS* (для вспомогательных ИЦ с известными элементами) и *AHIMS*; *AHJMS*; *AHINS*; *AHJNS*; *AHIPS*; *AHJPS* (для вспомогательных ИЦ с неизвестными элементами).

Четвертую группу составляют методы измерения двух неизвестных параметров ДЭЦ с использованием одного переходного процесса в ИЦ. Анализ показывает, что здесь может быть синтезирован только метод *BEIPQ*.

К пятой группе можно отнести методы измерения двух неизвестных параметров с использованием двух переходных процессов. Учитывая, что для реализации данных методов всегда используются два и более образцовых интервала времени, для этой группы можно синтезировать следующие методы: *BEINS*; *BEJNS*; *BEIPS*; *BEJPS*; *BFINS*; *BFJNS*; *BFIPS*; *BFJPS*.

Наконец, к шестой группе относятся методы измерения трех неизвестных параметров. Такие методы могут быть реализованы только с использованием двух образцовых резисторов и двух переходных процессов в ИЦ: *DFINS*; *BFIPS*; *BFJPS*.

Таким образом, представленная классификация позволяет в общем случае синтезировать 42 метода.

Синтез методов измерения параметров ДЭЦ по мгновенным значениям переходных процессов

Рассмотрим примеры синтеза методов, обеспечивающих наименьшее время измерения.

Если напряжение постоянного тока U_0 подключается к линейной активно-емкостной или индуктивно-активной цепи, то напряжение на средней точке цепи изменяется в соответствии с выражением

$$u(t) = U_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right].$$

Такой процесс в общем случае имеет три параметра: напряжение U_0 , постоянную времени ИЦ τ и текущее время t , так как процесс неперiodический. Для определения параметров процесса требуется решить систему трех уравнений.

Метод *AEINQ* [2], представляющий первую группу методов, обеспечивает сокращение числа уравнений в системе за счет того, что мгновенные значения сигнала на средней точке ИЦ берутся через одинаковые (в общем случае произвольные) интервалы времени Δt начиная с момента подключения напряжения к

измерительной цепи. Для рассматриваемого метода можно составить систему уравнений

$$\begin{cases} U_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) \right] = U_1; \\ U_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{2\Delta t}{\tau}\right) \right] = U_2. \end{cases} \quad (1)$$

Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рис. 2.

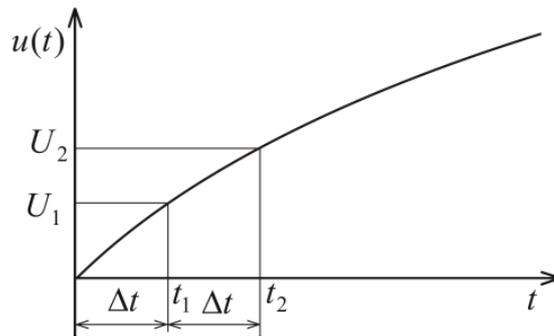


Рис. 2. Временные диаграммы, поясняющие метод *AEINQ*

Используя (1), можно определить постоянную времени ИЦ:

$$\tau = -\frac{\Delta t}{\ln\left(\frac{U_2 - U_1}{U_1}\right)}.$$

При реализации метода время измерения составляет $2\Delta t$.

Сокращение времени измерения могут обеспечить методы второй группы.

Метод *AFIMS* [3] предусматривает использование двух переходных процессов на участках ИЦ и двух образцовых резисторов. Рассмотрим реализацию метода на примере индуктивно-активной цепи. Метод заключается в том, что на измерительную цепь, состоящую из последовательно включенных образцового сопротивления, индуктивности и второго образцового сопротивления, подают напряжение постоянного тока; через образцовый интервал времени с момента подачи напряжения одновременно измеряют мгновенные значения напряжений на индуктивности и втором сопротивлении относительно общего вывода ИЦ.

Для метода можно составить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{U_0}{2} \left[1 + \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) \right] = U_1; \\ \frac{U_0}{2} \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) \right] = U_2. \end{cases} \quad (2)$$

Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рис. 3.

Из (2) можно определить неизвестную индуктивность $L_X = -\frac{2R_0\Delta t}{\ln\left[\frac{U_1-U_2}{U_1+U_2}\right]}$.

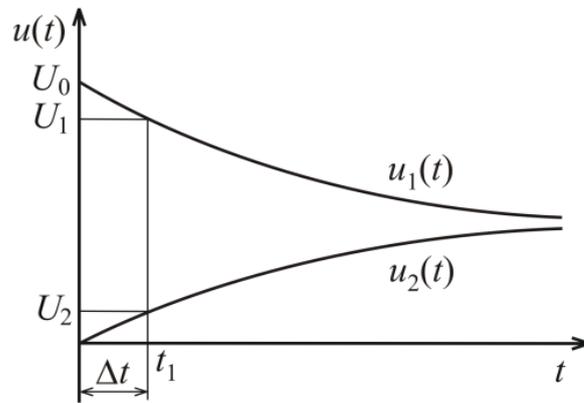


Рис. 3. Временные диаграммы, поясняющие метод *AFIMS*

При реализации метода время измерения составляет Δt .

Также малое время измерения обеспечивают методы третьей группы, использующие вспомогательные ИЦ. Рассмотрим в качестве примера метод, основанный на использовании вспомогательной ИЦ с произвольными элементами.

Метод *AHIMS* [4] заключается в том, что на первую последовательную активно-емкостную или индуктивно-активную цепь, состоящую из произвольных по значению элементов, средняя точка которой подключена ко второй последовательной активно-емкостной или индуктивно-активной измерительной цепи, один из элементов которой известен, подают напряжение постоянного тока; через образцовый интервал времени с момента подачи напряжения одновременно измеряют мгновенные значения напряжений на средних точках обеих цепей.

Для данного метода может быть составлена следующая система уравнений:

$$\begin{cases} U_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_1}\right) \right] = U_1; \\ U_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_2}\right) \right] = U_2, \end{cases} \quad (3)$$

где τ_1 и τ_2 – постоянные времени первой и второй ИЦ соответственно.

Временные диаграммы, поясняющие метод, приведены на рис. 4.

Из (3) можно определить постоянную времени ИЦ $\tau_2 = -\frac{\Delta t}{\ln\left(1 - \frac{U_2}{U_1}\right)}$.

При реализации метода время измерения составляет Δt .

Четвертую группу представляет метод *BEIPQ* [5].

Метод заключается в том, что на ИЦ, состоящую из последовательно включенных образцового резистора с известным значением сопротивления R_0 и ка-

тушки индуктивности, подают напряжение постоянного тока U_0 ; через образцовый интервал времени Δt с момента подачи напряжения измеряют первое мгновенное значение напряжения на катушке U_1 ; через такой же интервал времени измеряют второе мгновенное значение напряжения на катушке U_2 ; через такой же интервал времени измеряют третье мгновенное значение напряжения на катушке U_3 .

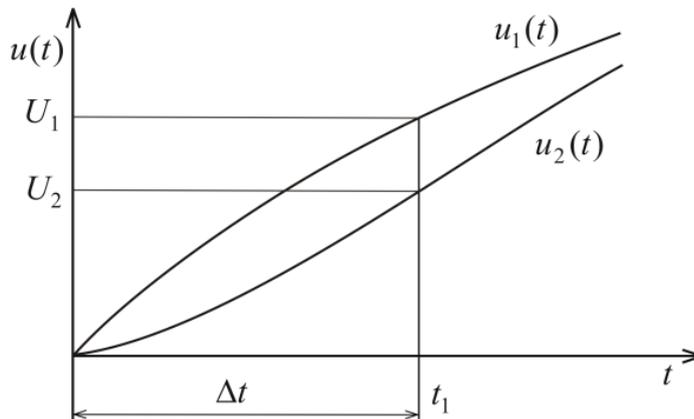


Рис. 4. Временные диаграммы, поясняющие метод АНМС

Для данного метода может быть составлена следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \frac{U_0}{R_0 + R_X} \left[R_X + R_0 \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) \right] = U_1; \\ \frac{U_0}{R_0 + R_X} \left[R_X + R_0 \exp\left(-\frac{2\Delta t}{\tau}\right) \right] = U_2; \\ \frac{U_0}{R_0 + R_X} \left[R_X + R_0 \exp\left(-\frac{3\Delta t}{\tau}\right) \right] = U_3. \end{cases} \quad (4)$$

Временные диаграммы для данного метода представлены на рис. 5.

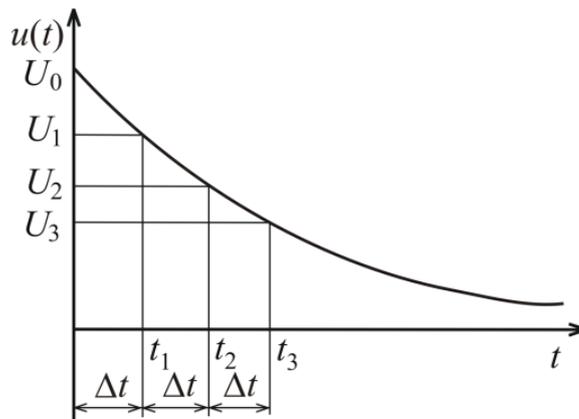


Рис. 5. Временные диаграммы, поясняющие метод ВЕІРQ

Используя мгновенные значения переходного процесса (4), можно определить неизвестные активное сопротивление и индуктивность катушки:

$$R_X = \frac{[U_3 - U_2][U_1 U_3 - U_2^2] R_0}{[U_2 - U_1]^3}; \quad L_X = -\frac{(R_X + R_0)\Delta t}{\ln\left(\frac{U_3 - U_2}{U_2 - U_1}\right)}.$$

Реализация метода предусматривает достаточно большое время измерения, равное $3\Delta t$.

Сокращение времени измерения могут обеспечить методы пятой группы, которые используют два переходных процесса.

Метод *BFINS* [6] заключается в том, что на ИЦ, состоящую из последовательно включенных образцового резистора с известным значением сопротивления R_0 , катушки индуктивности и второго образцового резистора R_0 , подают напряжение постоянного тока U_0 ; через образцовый интервал времени Δt с момента подачи напряжения одновременно измеряют первые мгновенные значения напряжения на катушке индуктивности U_{11} и втором образцовом резисторе U_{21} относительно общей шины; через образцовый интервал времени с момента первого измерения измеряют второе мгновенное значение напряжения на втором образцовом резисторе U_{22} относительно общей шины.

Для данного метода может быть составлена следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \frac{U_0}{2R_0 + R_X} \left(R_0 + R_X + R_0 e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right) = U_{11}; \\ \frac{U_0 R_0}{2R_0 + R_X} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right) = U_{21}; \\ \frac{U_0 R_0}{2R_0 + R_X} \left(R_0 + R_X + R_0 e^{-\frac{2\Delta t}{\tau}} \right) = U_{12}. \end{cases} \quad (5)$$

Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рис. 6.

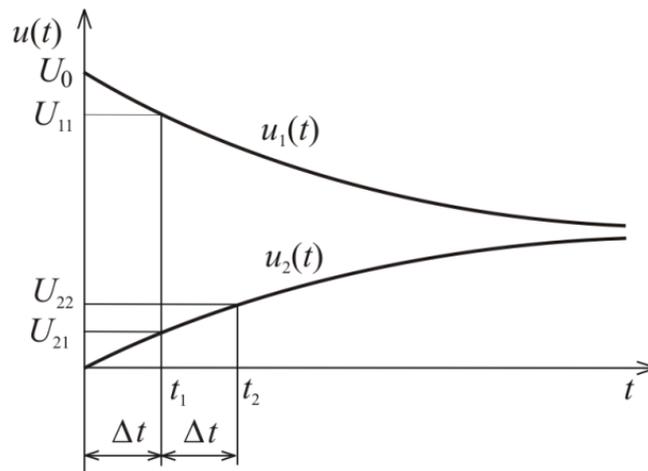


Рис. 6. Временные диаграммы, поясняющие метод *BFINS*

Используя мгновенные значения переходных процессов (5), получим выражения для индуктивности и активного сопротивления катушки:

$$R_X = \frac{R_0[U_{11}(U_{12} - U_{11}) + U_{21}(U_{12} - U_{21})]}{U_{21}^2}; \quad L_X = -\frac{(2R_0 + R_X)\Delta t}{\ln\left(\frac{U_{11} + U_{12}}{U_{21}}\right)}.$$

При реализации метода время измерения составляет $2\Delta t$.

Методы шестой группы обеспечивают измерение трех неизвестных параметров. Данные методы достаточно сложны и только начинают разрабатываться.

Примером может служить метод *DFIPS* [7], который заключается в том, что на ИЦ, состоящую из последовательно включенных первого образцового резистора с известным значением сопротивления R_0 , трехэлементного ДЭЦ и второго образцового резистора R_0 , подают напряжение постоянного тока U_0 ; через образцовый интервал времени Δt с момента подачи напряжения измеряют первые мгновенные значения напряжений на цепи, состоящей из ДЭЦ и второго образцового резистора, и втором образцовом резисторе относительно общего вывода ИЦ; через такой же интервал времени измеряют второе мгновенное значение напряжения на втором образцовом резисторе; через интервал времени Δt измеряют третье мгновенное значение напряжения на втором образцовом резисторе.

Рассмотрим метод на примере трехэлементной ДЭЦ, состоящей из катушки индуктивности с индуктивностью L_X и активным сопротивлением R_3 , параллельно которой включен резистор R_2 .

Для данного метода может быть составлена следующая система уравнений:

$$\begin{cases} U_0 - \frac{U_0 R_0}{R_\Sigma} - \left(\frac{U_0 R_0}{2R_0 + R_2} - \frac{U_0 R_0}{R_\Sigma} \right) \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) = U_{11}; \\ \frac{U_0 R_0}{R_\Sigma} + \left(\frac{U_0 R_0}{2R_0 + R_2} - \frac{U_0 R_0}{R_\Sigma} \right) \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) = U_{21}; \\ \frac{U_0 R_0}{R_\Sigma} + \left(\frac{U_0 R_0}{2R_0 + R_2} - \frac{U_0 R_0}{R_\Sigma} \right) \exp\left(-\frac{2\Delta t}{\tau}\right) = U_{22}; \\ \frac{U_0 R_0}{R_\Sigma} + \left(\frac{U_0 R_0}{2R_0 + R_2} - \frac{U_0 R_0}{R_\Sigma} \right) \exp\left(-\frac{3\Delta t}{\tau}\right) = U_{23}, \end{cases} \quad (6)$$

где R_Σ – общее сопротивление ИЦ.

Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рис. 7.

Используя (6), после преобразований получим:

$$R_2 = \frac{R_0(U_{11} + U_{21})(U_{23} - U_{22})(U_{23} - 2U_{22} + U_{21})}{(U_{22} - U_{21})^3 + (U_{21}U_{23} - U_{22}^2)(U_{23} - U_{22})} - 2R_0;$$

$$R_3 = \frac{R_0 R_2 [2(U_{21}U_{23} - U_{22}^2) - (U_{11} + U_{21})(U_{23} - 2U_{22} + U_{21})]}{R_0(U_{11} + U_{21})(U_{23} - 2U_{22} + U_{21}) + (R_2 + 2R_0)(U_{21}U_{23} - U_{22}^2)};$$

$$L_X = - \frac{\Delta t [R_0(R_0 + R_2 + R_3) + R_3(R_0 + R_2)]}{\ln\left(\frac{U_{23} - U_{22}}{U_{22} - U_{21}}\right)(2R_0 + R_2)}.$$

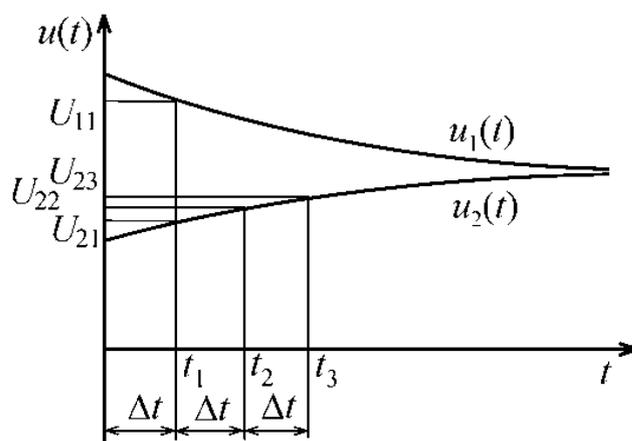


Рис. 7. Временные диаграммы, поясняющие метод *DFIPS*

Таким образом, предложенная классификация позволяет производить сравнительный анализ методов измерения параметров ДЭЦ и синтез новых методов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мелентьев В.С., Батищев В.И. Аппроксимационные методы и средства измерения параметров двухполюсных электрических цепей. – М: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 200 с.
2. Мелентьев В.С. Аппроксимационные методы измерения параметров линейных электрических цепей // Измерительная техника. – 2010. – № 10. – С. 57-59.
3. Мелентьев В.С., Батищев В.И., Костенко Е.В. Новый метод измерения параметров одноэлементных двухполюсных электрических цепей по мгновенным значениям переходного процесса // Информационно-измерительная техника: межвуз. сб. науч. тр. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2011. – Вып. 36. – С. 12-20.
4. Мелентьев В.С. Новое в измерениях параметров емкостных датчиков по мгновенным значениям переходных процессов // Датчики и системы. – 2010. – № 2. – С. 26-29.
5. Мелентьев В.С., Костенко Е.В., Миронов Д.А. Аппроксимационные методы раздельного определения параметров двухэлементных двухполюсных электрических цепей // Ползуновский вестник. – 2011. – № 3(1). – С. 47-50.
6. Мелентьев В.С., Губанов Н.Г., Латухова О.А., Смолина А.М. Совершенствование методов измерения параметров двухполюсных электрических цепей // Метрология. – 2013. – № 5. – С. 26-31.
7. Мелентьев В.С., Костенко Е.В. Метод измерения параметров трехэлементных двухполюсных электрических цепей // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – №1(29). – С. 109-114.

Статья поступила в редакцию 5 января 2014 г.

THE SYNTHESIS OF MEASUREMENT METHODS OF BIPOLAR ELECTRICAL CIRCUITS PARAMETERS ON THE INSTANT VALUES OF TRANSIENTS

V.S. Melent'ev, E.V. Kostenko, T.S. Evstifeeva, K.D. Levina

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

The classification of measurement methods of bipolar electrical circuits parameters on the instant values of transients is considered. Methods are classified according to the following criteria: number of unknown parameters of bipolar electrical circuit (one, two and more than two parameters); on principles of constructing the measuring circuit (number of sample resistors, the use of auxiliary circuits with known or unknown reactive elements); the parameters of the measurement process (the presence or absence of connection with the moment of connection the voltage to measuring circuit, the number of sample time intervals, the number of transients in the measuring circuit). As a result, all the methods are divided into six groups. A new approach to the synthesis of such methods is offered. Examines one method of each of the groups, synthesized on the basis of this approach.

Keywords: *bipolar circuits, transients, instant values, measuring circuit, time constant.*

*Vladimir S. Melentiev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Elena V. Kostenko, Postgraduate Student.
Tatyana S. Evstifeeva, Postgraduate Student.
Ksenia D. Levina, Student.*