

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВОЙСТВ АКТИВНЫХ ТРЕХПОЛЮСНИКОВ В ЦЕЛЯХ
РАСЧЕТА И АНАЛИЗА РАЗВЕТВЛЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ****Федоров М. М., Ткаченко А. А., Кутковой И. П.**

Рассмотрены основные свойства активных трехполюсников, разработаны методы определения параметров их эквивалентных схем замещения. Предложена методика расчета разветвленных электрических цепей с использованием схем замещения активных трехполюсников. Применение методики проиллюстрировано на конкретном примере. Рассмотрены подходы к расчету электрических цепей как с заданной топографией – путем аналитического нахождения эквивалентных ЭДС и сопротивлений, так и с неизвестной – с использованием опытов холостого хода и короткого замыкания. Метод применим при анализе схем с неизвестной топографией трехполюсников по результатам входных параметров.

Розглянуто основні властивості активних триполюсників, розроблені методи визначення параметрів еквівалентних схем заміщення. Запропоновано методику розрахунку розгалужених електричних ланцюгів з використанням схем заміщення активних триполюсників. Застосування методики проілюстровано на конкретному прикладі. Розглянуто підходи до розрахунку електричних ланцюгів як із заданою топографією – шляхом аналітичного знаходження еквівалентних ЕРС та опорів, так і з невідомою – з використанням дослідів холостого ходу і короткого замикання. Метод застосовується при аналізі схем з невідомою топографією триполюсників за результатами вхідних параметрів.

In the paper the basic properties of active three-points and the methods of determining the parameters of equivalent circuits are discussed. Design procedure of branched circuits using equivalent circuits of active three-point is proposed. Application of the technique is illustrated with examples. Approaches to calculation of electric circuits with a given topography – by finding an analytical equivalent EMF and resistance, as well as the unknown topography – using experimental load and short circuit are considered. The method is applicable in the analysis of circuits with unknown three-point topography as a result of input parameters.

Федоров М. М.

д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ДонНТУ

Ткаченко А. А.

канд. техн. наук, ст. преп. кафедры ЭСА ДГМА

Кутковой И. П.

ассистент кафедры ЭСА ДГМА

ivan_petrovi4_76@mail.ru

ДонНТУ – Донецкий национальный технический университет, Донецк

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск

УДК 621.3.011

Федоров М. М., Ткаченко А. А., Кутковой И. П.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВОЙСТВ АКТИВНЫХ ТРЕХПОЛЮСНИКОВ В ЦЕЛЯХ РАСЧЕТА И АНАЛИЗА РАЗВЕТВЛЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

В настоящее время существуют хорошо разработанные и обоснованные методы анализа и расчета разветвленных электрических цепей. Однако в ряде случаев нет необходимости рассчитывать электрическое состояние во всех ветвях электрической схемы. Особенно подобный вопрос актуален для разветвленных электрических систем со сложной топографией, в которой известны лишь параметры определенной части. Оценку состояния части электрической системы можно оценить с помощью свойств активных трехполюсников. В этой связи анализ свойств активных трехполюсников и использование их для расчета и анализа разветвленных электрических цепей является актуальным.

Известны методы (например, метод эквивалентного генератора), позволяющие определить ток, напряжение и мощность в отдельной ветви электрической цепи путем представления оставшейся части разветвленной электрической цепи в виде активного двухполюсника, который заменяют эквивалентным источником питания [1]. В работе [2] приведена методика оценки электрического состояния в трех ветвях, согласно которой выделяют три ветви, а оставшуюся часть электрической схемы представляют в виде активного трехполюсника, который в свою очередь заменяют эквивалентной схемой. Однако требуется дальнейшее развитие теории активных трехполюсников, использование их свойств для расчета и анализа разветвленных электрических цепей.

Целью работы является обоснование основных свойств активных трехполюсников, разработка методов определения параметров их эквивалентных схем замещения и использование их для расчета анализа разветвленных цепей.

Рассмотрим основные свойства активных трехполюсников на примере разветвленной электрической цепи, показанной на рис. 1.

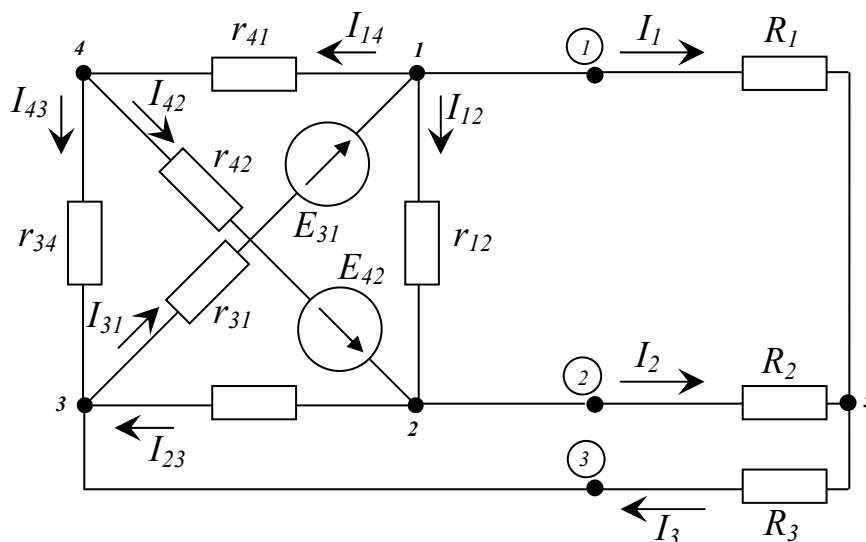


Рис. 1. Разветвленная электрическая цепь к пояснению свойств активного трехполюсника

В общем случае в разветвленных цепях можно выделить звезду или треугольник, а остальную часть схемы представить в виде активного трехполюсника.

Так на схеме рис. 1 выделены три ветви с резистивными сопротивлениями R_1 , R_2 , и R_3 , условно называемые нагрузкой. Остальная часть схемы может быть представлена активным трехполосником (рис. 2, а). Активный трехполосник может быть замещен эквивалентной схемой [2]. В этом случае схема имеет вид (рис. 2, б).

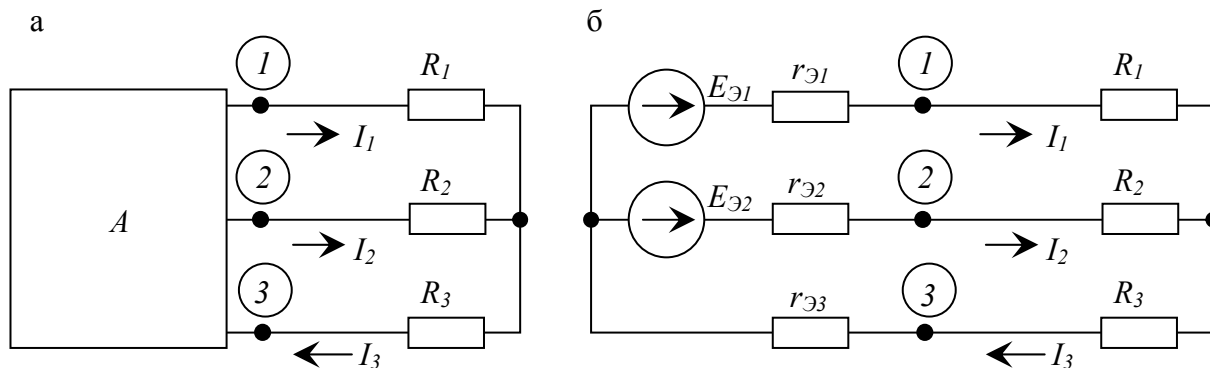


Рис. 2. Преобразование сложной электрической цепи с выделением трехполосника:
 а – схема с активным трехполосником; б – схема с заменой активного трехполосника эквивалентной схемой

Параметры схемы замещения активных трехполосников (ЭДС источников напряжения $E_{Э1}$, $E_{Э2}$ и сопротивлений $r_{Э1}$, $r_{Э2}$, $r_{Э3}$) могут быть определены расчетным и экспериментальным путями.

Величины $E_{Э1}$ и $E_{Э2}$ соответственно равны напряжениям холостого хода активного трехполосника $E_{Э1} = U_{X13}$, $E_{Э2} = U_{X23}$ [2] и могут быть определены экспериментально по результатам опыта холостого хода (рис. 3, а).

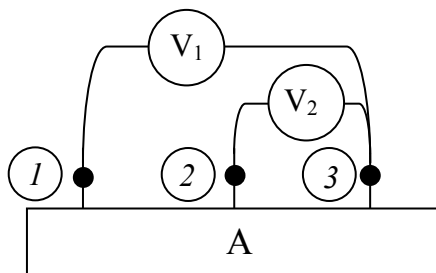


Рис. 3. Опыт холостого хода активного трехполосника

Величины входных сопротивлений $r_{Э1}$, $r_{Э2}$ и $r_{Э3}$ определяются с помощью входных сопротивлений пассивного трехполосника:

$$r_{Э1} = \frac{1}{2}(r_{ax1-2} + r_{ax3-1} - r_{ax2-3}); \quad r_{Э2} = \frac{1}{2}(r_{ax1-2} + r_{ax2-3} - r_{ax3-1}); \quad r_{Э3} = \frac{1}{2}(r_{ax2-3} + r_{ax3-1} - r_{ax1-2}), \quad (1)$$

Где r_{ax1-2} , r_{ax2-3} и r_{ax3-1} – входные сопротивления пассивного трехполосника, полученные из активного, соответственно относительно зажимов 1–2, 2–3 и 3–1.

Величины входных сопротивлений можно определить по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания. Проведя последовательно опыты короткого замыкания относительно зажимов 1–2, 2–3 и 3–1, получим токи I_{K31-2} , I_{K32-3} , I_{K33-1} , а из опыта холостого хода – напряжения U_{xx1-2} , U_{xx2-3} , U_{xx3-1} . Величины входных сопротивлений будут соответственно равны:

$$r_{\text{ex}1-2} = \frac{U_{\text{xx}1-2}}{I_{\text{кз}1-2}}; \quad r_{\text{ex}2-3} = \frac{U_{\text{xx}2-3}}{I_{\text{кз}2-3}}; \quad r_{\text{ex}3-1} = \frac{U_{\text{xx}3-1}}{I_{\text{кз}3-1}}. \quad (2)$$

Величины $r_{\text{Э}1}$, $r_{\text{Э}2}$ и $r_{\text{Э}3}$ можно определить и другими методами. Так, при проведении опытов короткого замыкания относительно зажимов 1–2, кроме тока $I_{\text{кз}1-2}$ можно измерить напряжение U_{2-3} (рис. 4). Из эквивалентной схемы замещения активного трехполюсника следует:

$$r_{\text{Э}1} = \frac{E_{\text{Э}1} - U_{2-3}}{I_{\text{кз}1-2}}; \quad r_{\text{Э}2} = \frac{E_{\text{Э}2} - U_{2-3}}{I_{\text{кз}1-2}}. \quad (3)$$

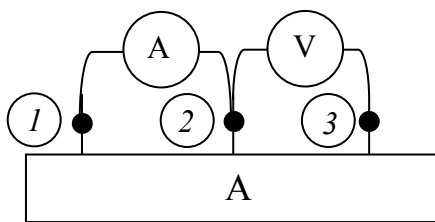


Рис. 4. Опыт короткого замыкания относительно зажимов 1–2

По аналогии, при проведении опытов короткого замыкания относительно зажимов 2–3, измеряют напряжение U_{1-2} . В этом случае:

$$r_{\text{Э}2} = \frac{E_{\text{Э}2} - U_{1-2}}{I_{\text{кз}2-3}}; \quad r_{\text{Э}3} = \frac{U_{1-2}}{I_{\text{кз}2-3}}. \quad (4)$$

Схема, представленная на рис. 1, была исследована экспериментальным и расчетным путем. Параметры элементов электрической цепи указаны в табл. 1.

Таблица 1

Параметры элементов электрической цепи по схеме рис. 1

Величина	r_{41}	r_{42}	r_{34}	r_{31}	r_{12}	r_{23}	R_1	R_2	R_3	E_{31}	E_{42}
Размерность	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	В	В
Значение	300	600	900	200	150	400	50	75	100	23,2	20

Используя известную методику [2] было рассчитано электрическое состояние схем активного трехполюсника, что дало возможность определить напряжения холостого хода $U_{\text{X}13}$ и $U_{\text{X}23}$. Кроме того, используя различные методы преобразования, определены входные сопротивления пассивного трехполюсника и далее сопротивления эквивалентной схемы замещения $r_{\text{Э}1}$, $r_{\text{Э}2}$ и $r_{\text{Э}3}$ (1). Параметры эквивалентной схемы замещения были определены и с помощью вышеуказанных опытов. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры схемы замещения активного трехполюсника по схеме рис 2, б

Параметры схемы замещения	$E_{\text{Э}1}$, В	$E_{\text{Э}2}$, В	$r_{\text{Э}1}$, Ом	$r_{\text{Э}2}$, Ом	$r_{\text{Э}3}$, Ом
Расчетным путем	15,1	13,35	35,87	70,52	95,06
Экспериментальным путем	15,0	13,1	35,3	70,6	95,4

Используя полученную эквивалентную схему замещения активного трехполюсника, нетрудно рассчитать токи нагрузки I_1, I_2, I_3 (например, методом узловых потенциалов). Результаты расчетов приведены в табл. 3. Величины токов также были проверены на экспериментальной модели (см. табл. 3).

Таблица 3

Результаты значений токов нагрузки

Токи нагрузки	$I_1, \text{мА}$	$I_2, \text{мА}$	$I_3, \text{мА}$
Расчетным путем	44,15	13,85	58,02
Экспериментальным путем	44,1	19,9	58,0

Из сравнения результатов расчета и экспериментов следует их практическая сходимость.

Полученные результаты электрического состояния токов нагрузки на элементах, позволяют путем использования законов Кирхгофа определить токи в ветвях активного трехполюсника. Используя второй закон Кирхгофа, находим токи I_{12}, I_{23}, I_{31} :

$$I_{12} = \frac{I_1 R_1 - I_2 R_2}{r_{12}}; \quad I_{23} = \frac{I_2 R_2 + I_3 R_3}{r_{23}}; \quad I_{31} = \frac{E_{31} - I_1 R_1 - I_3 R_3}{r_{31}}. \quad (5)$$

Используя первый закон Кирхгофа, определяем токи в оставшихся ветвях I_{42}, I_{43}, I_{14} . Они соответственно равны:

$$I_{42} = I_2 + I_{23} - I_{12}; \quad I_{43} = I_{31} - I_3 - I_{23}; \quad I_{14} = I_{31} - I_1 - I_{12}. \quad (6)$$

Результаты расчетов были подтверждены экспериментально (табл. 4).

Таблица 4

Величины токов в ветвях активного трехполюсника

Токи в ветвях активного трехполюсника	$I_{12}, \text{мА}$	$I_{23}, \text{мА}$	$I_{31}, \text{мА}$	$I_{42}, \text{мА}$	$I_{43}, \text{мА}$	$I_{14}, \text{мА}$
Расчетным путем	7,79	17,09	75,96	23,15	0,87	24,02
Экспериментальным путем	7,8	17,1	76,0	23,2	0,9	24,0

Свойства активных трехполюсников можно применить и для электрических схем с более сложной топографией. В качестве примера на рис. 5 представлена разветвленная электрическая цепь. Ее особенностью является тот факт, что S сечение I–II, проведенное через ветви с резистивными сопротивлениями R_1, R_2, R_3 разбивает приведенную схему на два активных трехполюсника, приведенных на рис. 6, а. Используя известные приемы [1] и [2], заменим активные трехполюсники A_1 и A_2 пассивными Π_1 и Π_2 , введя в ветви с токами I_1 и I_2 напряжения $E_{\mathcal{E}1}, E_{\mathcal{E}2}$, соответственно равные U_{xx1-9} и U_{xx2-6} .

Необходимо отметить, что $U_{1x} = U_{x1-3}' - U_{x1-3}''$, а $U_{2x} = U_{x2-3}' - U_{x2-3}''$. Следовательно, $E_{\mathcal{E}1} = E_{\mathcal{E}1}' - E_{\mathcal{E}1}''$, а $E_{\mathcal{E}2} = E_{\mathcal{E}2}' - E_{\mathcal{E}2}''$. Здесь, $E_{\mathcal{E}1}'$ и $E_{\mathcal{E}1}''$ – ЭДС источников напряжения схемы замещения первого активного трехполюсника, а $E_{\mathcal{E}2}'$ и $E_{\mathcal{E}2}''$ – второго. Используя вышеуказанную методику, пассивные трехполюсники заменяем схемами в виде звезды.

В результате получим схему, приведенную на рис 6, б. Здесь $r_{\varepsilon 1}'$, $r_{\varepsilon 1}''$ и $r_{\varepsilon 3}'$ – эквивалентные сопротивления пассивного трехполюсника Π_1 , полученного из активного A_1 ; $r_{\varepsilon 1}''$, $r_{\varepsilon 2}''$ и $r_{\varepsilon 3}''$ – эквивалентные сопротивления пассивного трехполюсника Π_2 , полученного из активного A_2 .

Таким образом, результирующая эквивалентная схема замещения, приведенная на рис. 6, б, является результатом сложения эквивалентных схем замещения первого и второго активных трехполюсников (рис. 7).

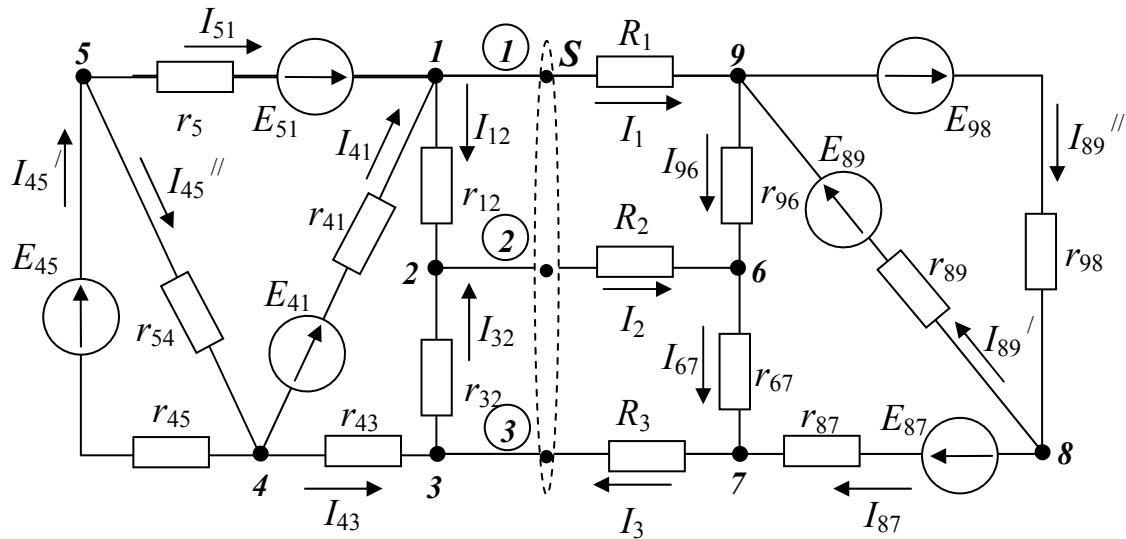


Рис. 5. Сложная разветвленная электрическая цепь

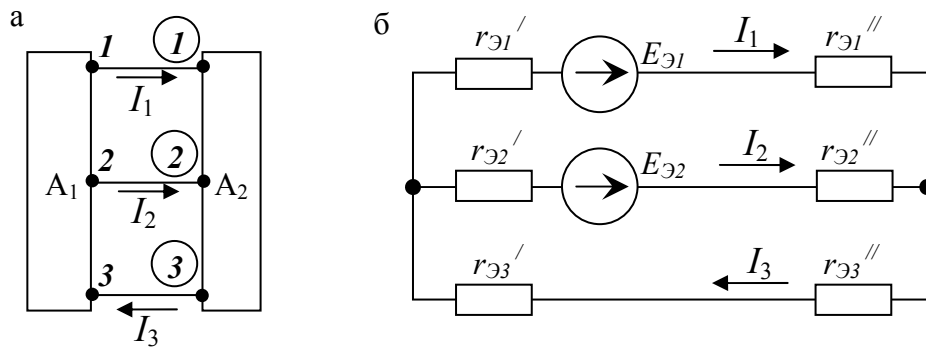


Рис. 6. Эквивалентная схема разветвленной цепи с двумя активными трехполюсниками: а – схема цепи с двумя активными трехполюсниками A_1, A_2 ; б – схема замещения

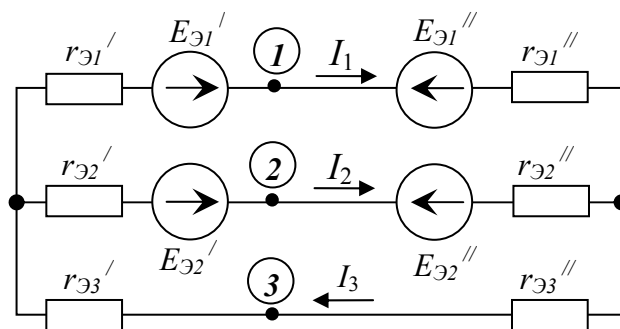


Рис. 7. Формирование эквивалентной схемы замещения электрической цепи с двумя активными трехполюсниками

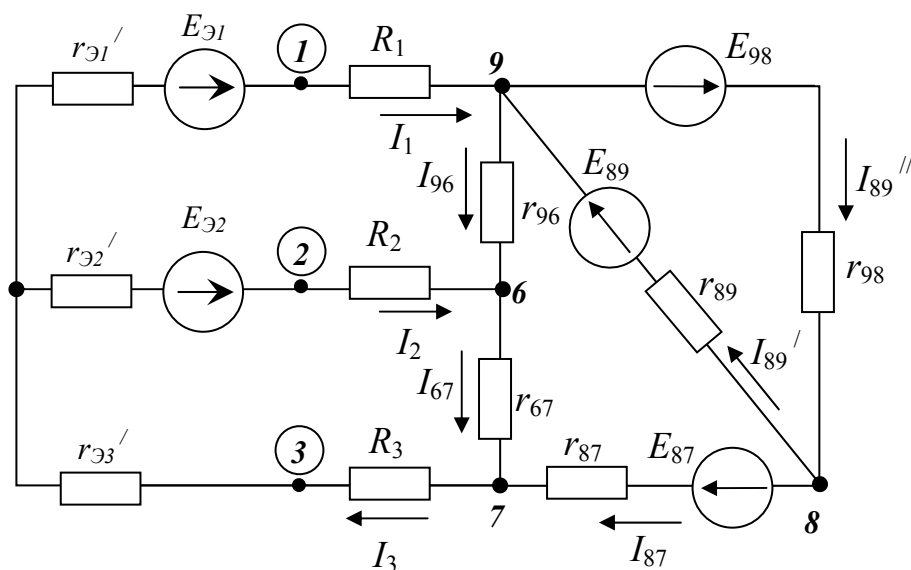


Рис. 9. Схема для определения токов второго активного трехполюсника

Применяя второй закон Кирхгофа, определяем токи I_{96}, I_{67} :

$$I_{96} = \frac{E_{Э1} - E_{Э2} - I_1(r_{Э1}' + R_1) + I_2(r_{Э2}' + R_2)}{r_{96}}; \quad I_{67} = \frac{E_{Э2} - I_3(r_{Э3}' + R_3) + I_2(r_{Э3}' + R_2)}{r_{67}}. \quad (12)$$

Из первого закона Кирхгофа для узла 7 имеем:

$$I_{87} = I_3 - I_{67}. \quad (13)$$

По второму закону Кирхгофа определяем ток I_{89}', I_{89}'' :

$$I_{89}' = \frac{E_{89} - E_{87} - I_{96}r_{96} - I_{67}r_{67} + I_{87}r_{87}}{r_{89}}; \quad I_{89}'' = \frac{E_{98} + E_{87} + I_{96}r_{96} + I_{67}r_{67} - I_{87}r_{87}}{r_{98}}. \quad (14)$$

Таким образом, используя свойства активного трехполюсника, первый и второй законы Кирхгофа, были определены токи во всех ветвях разветвленной электрической цепи.

ВЫВОДЫ

Предложенная методика расчета и анализа электрических цепей, основанная на использовании свойств активных трехполюсников, позволяет расширить возможности анализа электрического состояния различных частей разветвленных электрических цепей. Метод применим при анализе схем с неизвестной топографией трехполюсников по результатам входных параметров.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – [10-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Гардарики, 2006. – 640 с.
2. Федоров М. М. Эквивалентные схемы замещения активных трехполюсников / М. М. Федоров, В. В. Корощенко, В. Е. Михайлов // Сборник научных трудов УкрНИИВЭ. Взрывозащищенное электрооборудование. – Донецк : ООО «Юго-Восток, Лтд», 2011. – С. 55–61.

Статья поступила в редакцию 20.10.2011 г.