

*С. Н. Медведева, В. И. Чернецов, М. В. Чернецов*

## ОТОБРАЖЕНИЯ ТИПОВЫХ СТРУКТУР ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ В СТРУКТУРЫ ОБОБЩЕННЫХ СИГНАЛЬНЫХ ГРАФОВ

*S. N. Medvedeva, V. I. Chernetsov, M. V. Chernetsov*

## DISPLAY TYPICAL STRUCTURES OF MEASUREMENT CIRCUITS IN THE STRUCTURE OF THE GENERALIZED SIGNAL GRAPHS

**А н н о т а ц и я. Актуальность и цели.** Объектом исследования являются измерительные цепи типовых объектов разной природы: физические и биологические объекты, цифроаналоговые преобразователи на основе поразрядных резистивных сеток, длинные линии связи, резистивно-емкостные датчики и др. Они отображаются с помощью обобщенных сигнальных графов (ОСГ), и их параметры рассчитываются графоаналитическими методами. Целью работы является уточнение классификации ОСГ для типовых структур измерительных цепей. **Материалы и методы.** В основе исследования использован топологический подход к изучаемым объектам и явлениям. Полученные результаты согласуются с основными положениями теории графов и алгебраических методов, позволяющих быстро получить математические выражения. **Результаты.** Исследованы различные объекты и их структуры в виде ОСГ. Выявлено, что в графах типовых измерительных схем часто встречаются повторяющиеся по топологии подграфы. Среди топологических структур как типовые элементы необходимо выделить звездообразные, кольцевые, меандровые и ленточные ОСГ. Получены уравнения для расчета параметров типовых измерительных схем. **Выводы.** Показано, что среди всех приведенных структур ОСГ особое место занимают ленточные ОСГ, которые можно рассматривать как наиболее универсальные типовые элементы, из которых могут быть сложены обобщенные сигнальные графы иных типов. Отображение структур измерительных цепей в виде ОСГ имеет практический интерес, поскольку они характеризуют реальные физические объекты и упрощают расчет их параметров, используя топологические формулы для типовых измерительных цепей.

**A b s t r a c t. Background.** The object of study is the measuring circuit of the model objects of different nature: physical and biological objects, digital-to-analog converters on the basis of bit-for-bit resistive nets, long lines of communication, a resistive-capacitive sensors etc. They are displayed by means of the generalized signal graph (GSG), and their parameters are calculated by the graphic-analytical methods. The aim of the work is to clarify the classification of GSG for typical structures of measuring circuits. **Materials and methods.** The study is based on the topological approach to the studied objects and phenomena. The results obtained are consistent with the basic provisions of graph theory and algebraic methods, allowing to quickly obtain mathematical expressions. **Results.** Various objects and their structures in the form of GSG are investigated. It is revealed that in the graphs the standard measurement schemes are often found repeated on the topology of the subgraphs. Among topological structures as standard elements it is necessary to allocate star-shaped, ring, meander and tape GSG. The equations for calculating the parameters of a typical measurement applications. **Conclusions.** It is shown that among all the above structures GSG occupy a special place tape GSG, which can be considered as the most universal typical elements, of which can be composed of generalized signal graphs

of other types. Displaying the structures of measuring circuits in the form of GSG is of practical interest because they characterize real physical objects and simplify the calculation of their parameters using topological formulas for typical measuring circuits.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** измерительная цепь, эквивалентная схема замещения, обобщенный сигнальный граф.

**К e y w o r d s:** measuring circuit, the equivalent circuit of substitution, generalized signal graph.

При измерениях физических величин с использованием параметрических датчиков [1, 2], а также измерениях параметров физических объектов, свойства которых описываются электрическими схемами замещения в общем случае в виде многополюсных электрических цепей [3–5], число всевозможных структур измерительных цепей практически безгранично. Вместе с тем, даже не проводя специальных статистических исследований, достоверно можно утверждать, что существует достаточно ограниченный ряд типовых структур, которые встречаются наиболее часто и этот факт имеет вполне рациональные объяснения.

Во-первых, часто топологические особенности являются следствием действия фундаментальных физических принципов и проявления свойств физических объектов. Достаточно привести в качестве примера принцип симметрии, который подразумевает наличие некоторого центра, относительно которого располагаются элементы исследуемых систем. Такие системы в различных проекциях вполне логично отображаются звездообразными топологическими структурами. Другой пример – широко распространенное свойство изотропности предполагает равномерное распределение элементов (частиц, локальных областей) в пространстве. При этом исследуемые объекты в их сечениях отображаются последовательно расположенными однотипными элементами.

Во-вторых, математические модели для описания свойств физических объектов с целью экономизации описания и доказательства адекватности моделей часто представляются в виде типовых структур (звезды, кольца, ленты и т.п.).

В-третьих, в инженерной практике широко применяются типовые структуры, свойства которых изначально определяют свойства синтезируемого объекта. Например, принцип каскадного включения элементарных двухполюсных цепей в виде, например, ленточных структур [2, 4, 5] позволяет уменьшить номенклатуру комплектующих изделий, так как предполагает применение однотипных элементов или блоков.

Описание схем замещения потенциально токовыми (ПТГ) и обобщенными сигнальными (ОСГ) графами упрощает как анализ, так и синтез измерительных цепей, что является актуальной задачей.

Ниже рассматриваются типовые измерительные цепи и соответствующие им структуры ОСГ. При этом параллельно, в качестве еще одной цели параграфа, рассматриваются типовые задачи анализа измерительных цепей и методы их решения.

### *Дискретные электрические модели объектов различной природы*

Для идентификации физических и биологических объектов используется описание свойств объекта в виде участка электрической цепи – пассивного или активного двухполюсника. Всевозможные схемы замещения в настоящее время подробно изучены и классифицированы. Рассмотрим наиболее широко применяемые схемы (формы) электрических цепей.

*Формы Фостера* включают в себя структуры двухполюсников, показанные на рис. 1, а... з [5].

Для измерения комплексного сопротивления  $Z$  одного из более сложных двухполюсников, приведенного на рис. 1, з, составим соответствующие ему ПТГ и ОСГ, показанные на рис. 2, а и б. Рассматриваемый ОСГ характеризуется звездообразной топологией [5]. Его определитель описывается выражением

$$\Delta = \left[ RC_0 p + 1 + \sum_{k=1}^n \frac{R_k C_0 p}{(R_k C_k p + 1)} \right] \cdot \prod_{i=1}^n (R_i C_i p + 1), \quad (1)$$

а искомое комплексное сопротивление

$$Z = \frac{E}{i_0} = \frac{\Delta}{C_0 p \prod_{i=1}^n (R_i C_i p + 1)} = R_0 + \frac{1}{C_0 p} + \sum_{k=1}^n \frac{R_k}{(R_k C_k + 1)} \quad (2)$$

где  $E$  и  $i_0$  – ЭДС и ток источника энергии, подаваемые на вход двухполосника рис. 1,з.

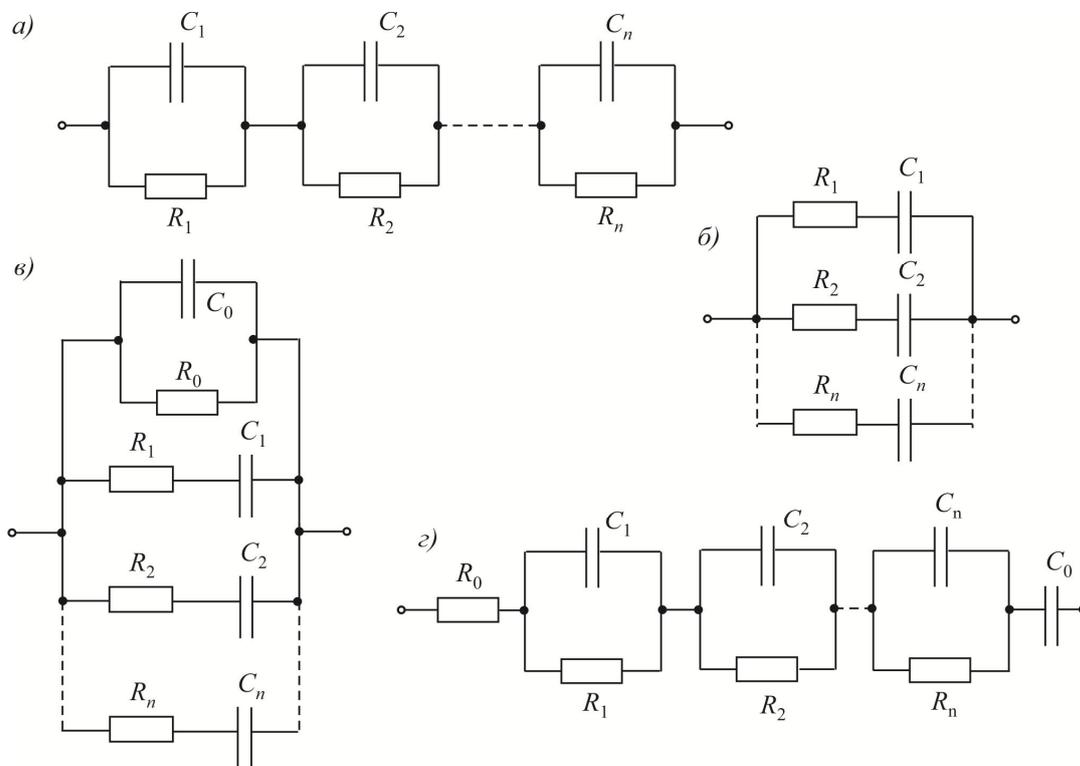


Рис. 1. Канонические структуры двухполосников в форме Фостера [5]

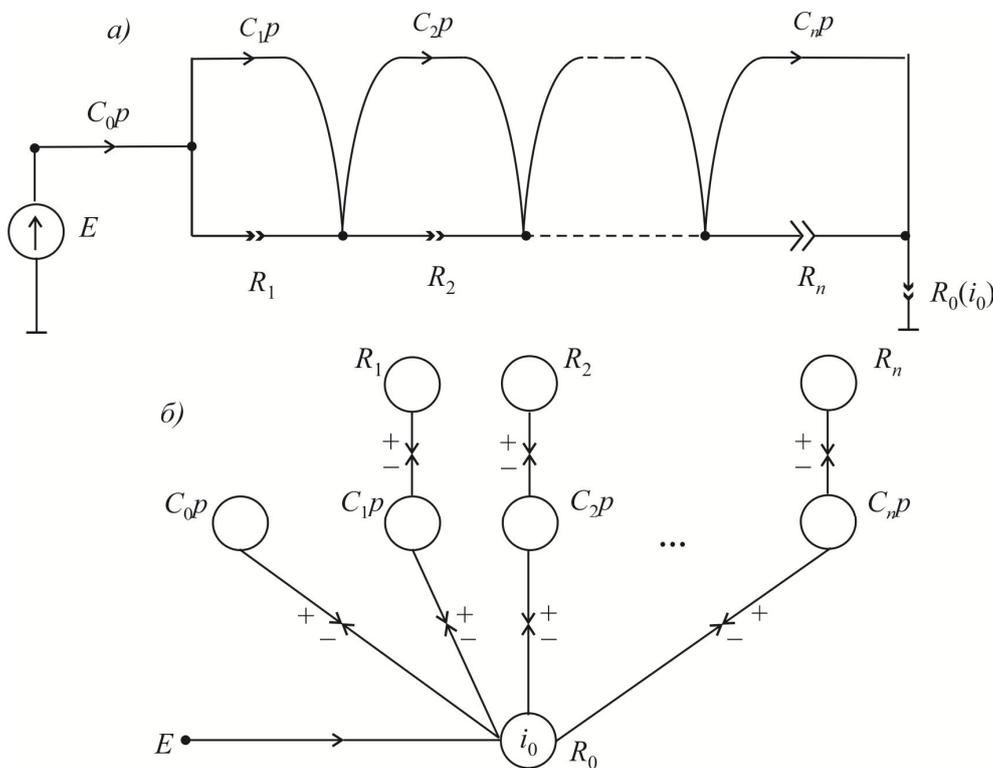


Рис. 2. Схема ПГТ(а) и ОСГ(б) для двухполосника Фостера рис. 1,з

В качестве другого примера рассмотрим схему для измерения комплексного сопротивления  $Z$  двухполюсника, представленного на рис. 1, в. Соответствующие ПТГ и ОСГ приведены на рис. 3. В данном случае используется схема с токовым питанием измерительной цепи. Для определителя и комплексного сопротивления будут верны выражения

$$\Delta = \left[ R_0 C_0 p + 1 + \sum_{k=1}^n \frac{R_0 C_k p}{(R_k C_k p + 1)} \right] \cdot \prod_{i=1}^n (R_i C_i p + 1), \quad (3)$$

$$Z = \frac{U_0}{I} = \frac{R_0}{R_0 C_0 p + 1 + \sum_{k=1}^n \frac{R_0 C_k p}{R_k C_k p + 1}}. \quad (4)$$

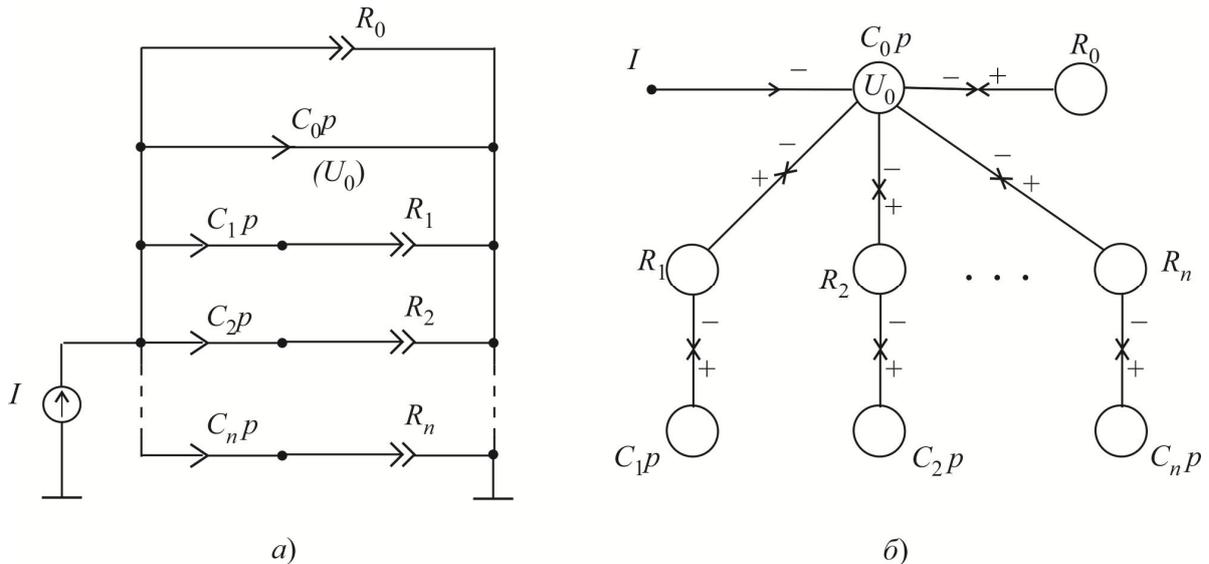


Рис. 3. Схема ПТГ (а) и ОСГ (б) для двухполюсника Фостера рис. 1, в

Последнее выражение, если представить анализируемый параметр через комплексную проводимость

$$Y = \frac{1}{Z} = C_0 p + \frac{1}{R_0} + \sum_{k=1}^n \frac{C_k p}{(R_k C_k p + 1)}, \quad (5)$$

по структуре практически повторяет формулу (2), что объясняется параллельным включением  $R_i C_i$ -цепочек. Это же свойство отображается и в звездообразной топологии ОСГ (см. рис. 3, б).

Таким образом, двухполюсникам со структурой в форме Фостера свойственна звездообразная структура ОСГ. Но такая закономерность типична лишь в случае, если в двухполюсник не вводятся искусственно некоторые дополнительные элементы.

*Формы Кауэра* представляются структурами двухполюсников, примеры которых показаны на рис. 4, а... г [5].

Рассмотрим пример определения комплексного сопротивления  $Z$  со структурой рис. 4, а. Соответствующие ПТГ и ОСГ приведены на рис. 5. В данном случае возникают определенные сложности при записи в общем виде выражений для  $\Delta$  и  $Z$ . Используя формулу разложения по вершине [6], для искомых параметров можно записать

$$\Delta = C_1 p \Delta_{G1R} + \Delta_{G2C} = C_1 p \Delta_{G1R} + C_2 p \Delta_{G2R} + C_3 p \Delta_{G3R} + \dots + C_n p R_n; \quad (6)$$

$$Z = \frac{U_1}{I} = \frac{1}{\Delta} \{ R_1 \Delta_{G2C} + R_2 \Delta_{G3C} + \dots + R_n \}, \quad (7)$$

где  $\Delta_k$  – определитель части ОСГ, не касающегося  $k$ -го контура, т.е. контур может начинаться с вершины  $R_1, C_2, R_2, C_3, \dots, k = 1, \dots, n$ ,  $n$  – количество однотипных элементов в схеме 4, а (см. рис. 5, б).

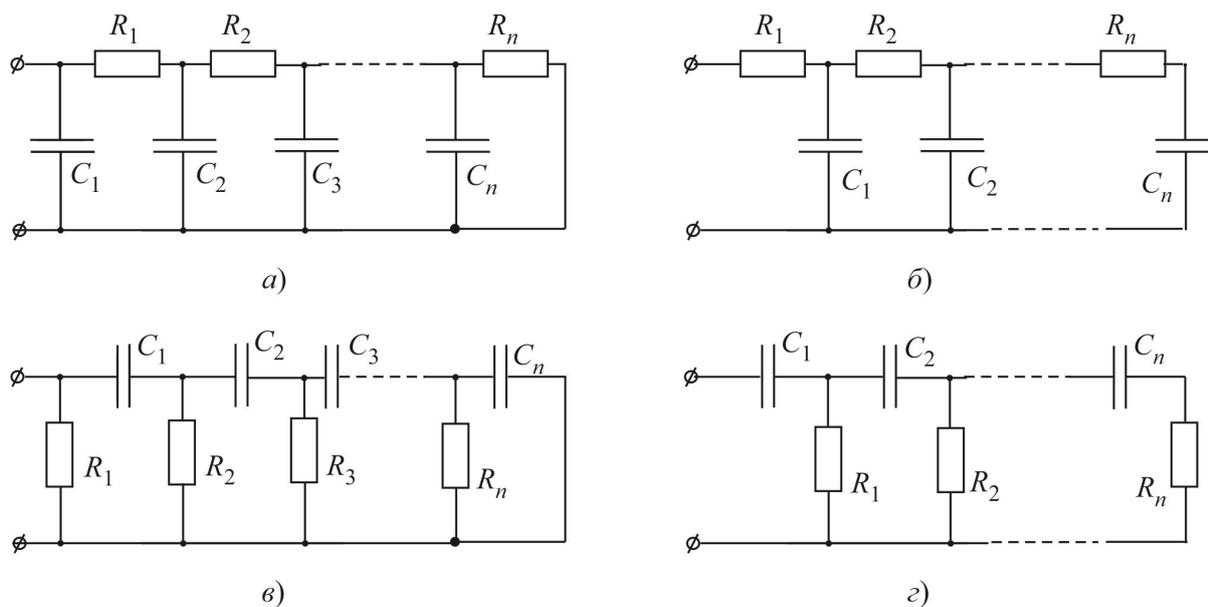


Рис. 4. Канонические структуры двухполюсников в форме Кауэра

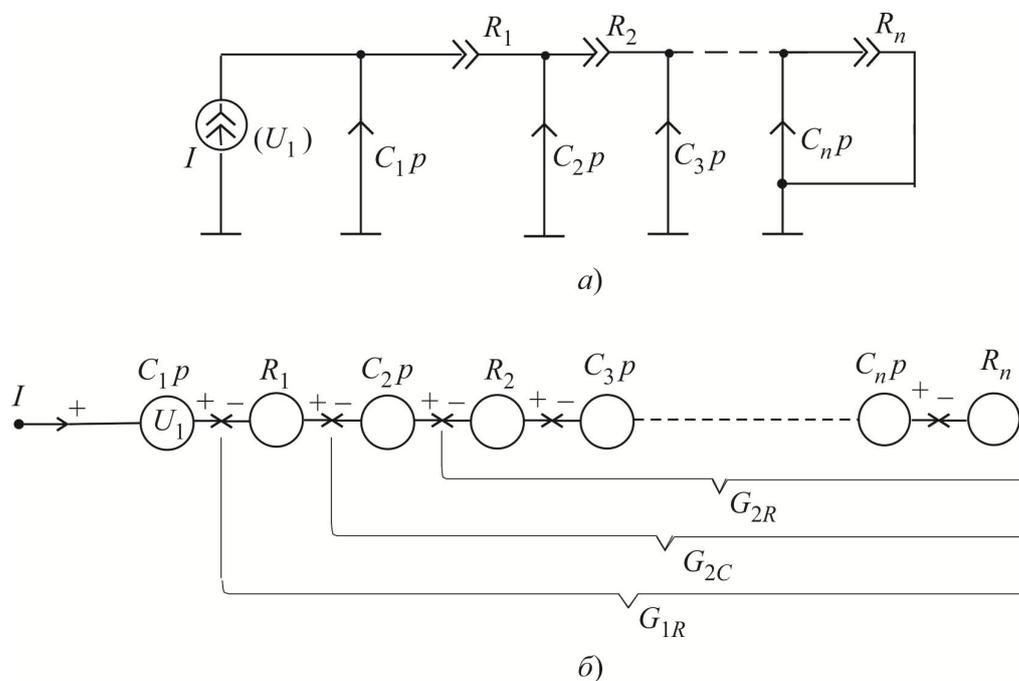


Рис. 5. Схема ПТГ (а) и ОСГ (б) для двухполюсника Кауэра рис. 4,а

Из рассмотренного примера видно, что структуры Кауэра характеризуются ленточными графами, которые не приводятся к удобным для анализа формам Фостера.

Рассмотрим примерные структуры ОСГ для анализа других типовых измерительных цепей.

#### **Измерительные схемы ЦАП на основе поразрядных резистивных сеток**

Как известно [7], цифроаналоговые преобразователи (ЦАП), которые строятся на основе поразрядных резистивных сеток, характеризуются каскадным включением разрядов. В данном отношении соответствующие схемы и особенно однородные обобщенные сигнальные графы должны быть близки по свойствам к схемам двухполюсников в форме Кауэра. Отличие, очевидно, заключается в том, что формально при работе ЦАП мы имеем изменяемую структуру, но, что весьма существенно, однородный ОСГ остается неизменным. Следовательно, анализ свойств ЦАП, используя графоаналитические методы, существенно упрощается по сравнению с анализом традиционными методами электротехники.

Проиллюстрируем сказанное на примере методики анализа погрешностей ЦАП, построенного на  $R-2R$  сетке с токовыми источниками активного входного воздействия (см. рис. 6,а). При этом будем использовать известный метод автономного источника [6, 9].

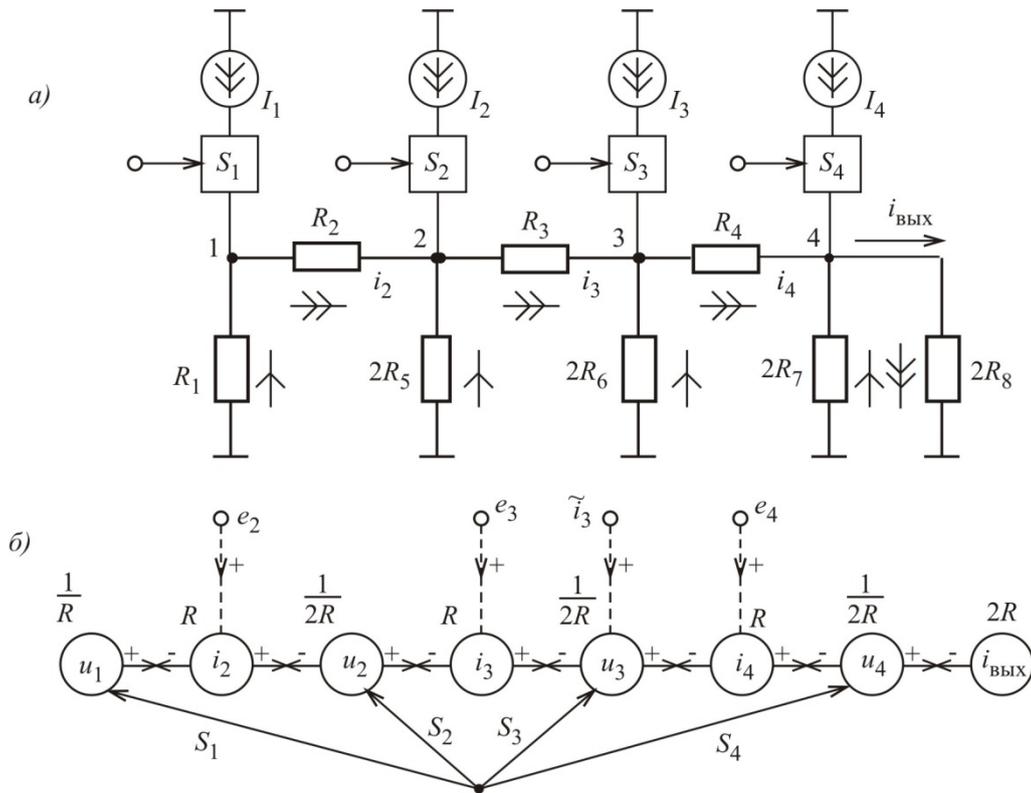


Рис. 6. Схема ЦАП (а) и соответствующий ей ОСГ (б)

Решим задачу оценки влияния изменений сопротивлений резисторов на информативные параметры выходных сигналов электрических цепей путем приведения линейного резистора с изменяющимися параметрами к автономному двухполюснику [6, с. 205]. Такое приведение осуществляется путем дифференцирования исходного уравнения  $U_k = R_k I_k$  или  $I_k = Y_k U_k$ , которое после перехода к конечным приращениям дает  $U_k = R_k i_k + e_{Rk}$  или  $i_k = Y_k U_k + i_{Yk}$ , где  $e_{Rk} = i_k \cdot \Delta R_k$ ,  $i_{Yk} = U_k \cdot \Delta Y_k$ . При этом значения тока  $i_k$  и напряжения  $U_k$  предполагаются известными из расчета, проводимого в статическом режиме при  $\Delta R_k = 0$  и  $\Delta Y_k = 0$ .

Структура измерительной цепи ЦАП (рис. 6,а) представлена, как и структуры Каузера, ленточным графом, который соответствует ОСГ, приведенному на рис. 6,б. При построении ОСГ принято:  $I_k = I$ ,  $k = 1, 2, 3, 4$ ;  $R_k = R$ ,  $k = 1, 2, \dots, 8$ , и значения коэффициентов передачи ключей  $S_k = 0 \vee 1$ ,  $k = 1, 2, 3, 4$ . Значения весов вершин соответствуют их идеальным значениям при отсутствии погрешностей. Токвые вершины отмечены соответствующими им токами, а потенциальные – через потенциалы точек 1, 2, 3 и 4, указанных на схеме рис. 6,а. В идеальном случае определитель ОСГ имеет значение

$$\Delta = \left[ \left( \frac{R}{R} + 1 \right) \left( \frac{R}{2R} + 1 \right) + \frac{R}{R} \right] \cdot \left[ \left( \frac{R}{2R} + 1 \right) \left( \frac{2R}{2R} + 1 \right) + 1 \right] + \left[ \frac{2R \cdot R}{2R} + R + 2R \right] \left[ \frac{R}{R \cdot 2R} + \frac{1}{2R} + \frac{1}{R} \right] = 24, \quad (8)$$

а выходной ток (информативный параметр) описывается выражением

$$i_{\text{ВЫХ}} = \frac{I}{24} \{ S_1 + 2S_2 + 4S_3 + 8S_4 \}, \quad (9)$$

где в фигурных скобках обозначен коэффициент передачи соответствующего ключа, равный либо 0, либо 1.

Для оценки влияния на ток  $i_{\text{вых}}$  изменений межрядных резисторов  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$  запишем уравнения, описывающие идеальные значения токов, протекающих через эти резисторы [5, с. 22]:

$$\left. \begin{aligned} i_2 &= \frac{I}{24} \{8S_1 - 8S_2 - 4S_3 - 2S_4\}; \\ i_3 &= \frac{I}{24} \{4S_1 + 8S_2 - 8S_3 - 4S_4\}; \\ i_4 &= \frac{I}{24} \{2S_1 + 4S_2 + 8S_3 - 8S_4\}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Влияние изменений значений резисторов обозначим через соответствующие изменения ЭДС, представленные в ОСГ вершинами-истоками  $e_2 = i_2 \cdot \Delta R$ ,  $e_3 = i_3 \cdot \Delta R$  и  $e_4 = i_4 \cdot \Delta R$ , которые показаны на рис. 6,б пунктиром. С учетом (10) легко определить абсолютные погрешности, приведенные к выходу, т.е. получаемые делением на коэффициент передачи ЦАП, равный 24:

$$\left. \begin{aligned} \Delta i_{\text{вых}}^{<2>} &= \frac{I}{24^2} \cdot \frac{\Delta R}{R} \{8S_1 - 8S_2 - 4S_3 - 2S_4\}; \\ \Delta i_{\text{вых}}^{<3>} &= \frac{I}{24^2} \cdot \frac{\Delta R}{R} \{4S_1 + 8S_2 - 8S_3 - 4S_4\}; \\ \Delta i_{\text{вых}}^{<4>} &= \frac{I}{24^2} \cdot \frac{\Delta R}{R} \{2S_1 + 4S_2 + 8S_3 - 8S_4\}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Таким образом, по ОСГ достаточно просто можно оценить как параметры ИЦ, так и погрешности, вызванные изменением резисторов ЦАП.

### *Дискретные схемы замещения длинных линий связи*

При анализе электрических цепей с распределенными параметрами в электротехнике используется прием представления участков таких цепей в виде дискретных моделей, например, схемы замещения линий электропередач в электроэнергетике. Длинная линия может быть представлена схемой замещения рис. 7,а [8, с. 419], где  $R_0$  – продольное активное сопротивление единицы длины линии,  $L_0$  – индуктивность единицы длины линии,  $C_0$  – емкость единицы длины линии и  $G_{\Pi}$  – поперечная проводимость единицы длины линии.

Данный пример показывает случай, когда схема замещения состоит из бесконечного числа дискретных элементов. Ее описание осуществляется аналитически в виде асимптотических дифференциальных уравнений [8]. Вместе с тем, используя топологические методы анализа, имеется возможность построения схем замещения электрических цепей с распределенными параметрами в виде схем, содержащих конечное число дискретных элементов.

Общая идея предлагаемого подхода заключается в том, что схема длинной линии связи отображается в виде звеньев ОСГ, которые соответствуют элементарному звену  $dx$  рассматриваемой длинной линии связи.

Для изображенной на рис. 7,а схемы замещения элементарного звена соответствующие ПТГ и ОСГ имеют вид, показанный на рис. 7,б и в соответственно. ОСГ, изображенный на рис. 7,в, имеет топографическую структуру в виде меандрового ОСГ.

В соответствии с целями обзора для нас существенно, что ОСГ, отражающий длинную линию связи, может быть представлен ленточным графом. Действительно, если воспользоваться методом исключения висячих вершин  $L_0 p dx$  и  $R_{\Pi} dx$  (что, по сути, соответствует объединению последовательных и параллельных элементов), то ОСГ рис. 7,в будет представляться в виде рис. 8.

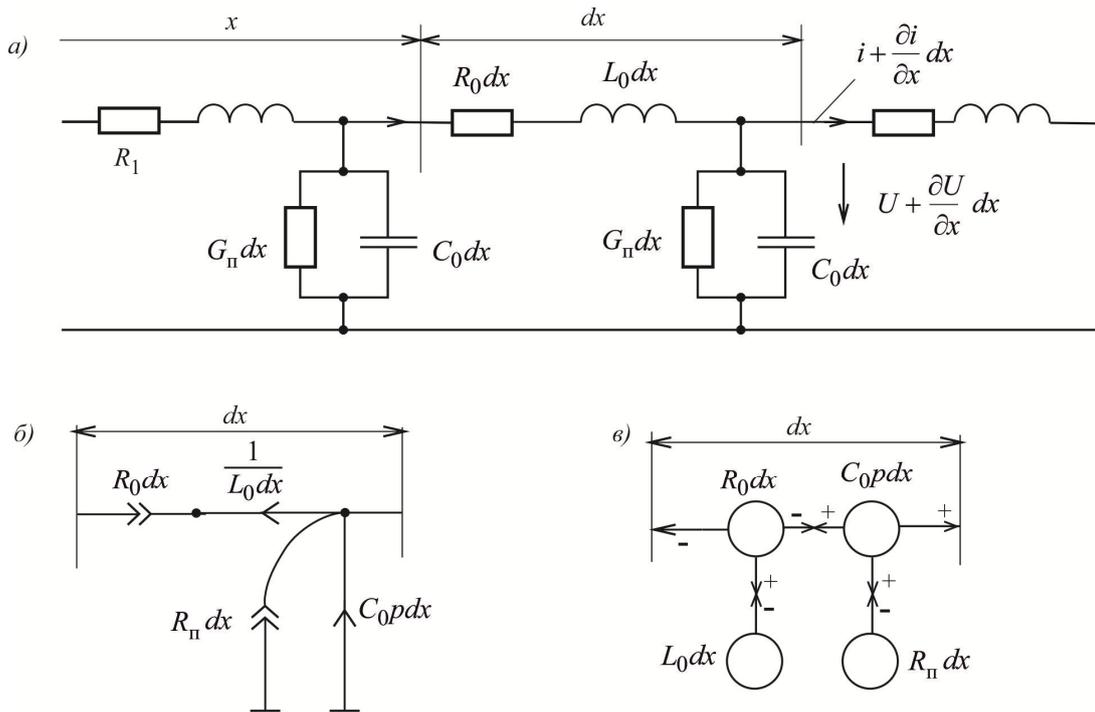


Рис. 7. Схема замещения длинной линии связи (а) и соответствующие ей ППГ (б) и ОСГ (в)

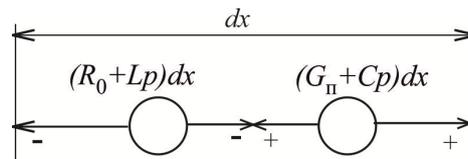


Рис. 8. ОСГ для схемы замещения элементарного звена длинной линии

### Дискретные схемы замещения для резистивно-емкостных датчиков

В общем случае для описания схемы замещения резистивно-емкостного датчика (РЕД) [10] требуется применять методы электродинамики – уравнения Максвелла. Альтернативой этому может служить использование дискретных схем замещения, в которых звенья с распределенными параметрами заменяются рядом  $RC$ -цепочек. Например, если учитывать только влияние емкости связи  $C_c$ , то схему замещения можно представить в виде рис. 9,а, где представлен случай включения РЕД в виде «потенциометрического» делителя.

На рисунке приняты следующие обозначения:  $R_n$  и  $R_n$  – сопротивления РЭ слева и справа от ПЭ;  $R_{ПЭ}$  – сопротивление участка РЭ под подвижным элементом. Соответствующие рассматриваемой схеме ППГ и ОСГ показаны на рис. 9,б и в соответственно. Получаемый для рассматриваемой измерительной схемы однородный ОСГ имеет форму кольца, но в данном графе можно выделить подграфы, например, подграф  $G^*$ , которые представляют собой ленточные графы.

Анализ дискретных схем пассивных линий задержки [11] показал, что граф, соответствующий схеме замещения многозвенной линии задержки, по сути, превращается в ленточный обобщенный сигнальный граф.

Рассматривая обобщенные сигнальные графы, которые соответствуют типовым измерительным схемам, можно сделать вывод о том, что в графах часто встречаются повторяющиеся по топологии подграфы. Среди таких топологических структур, как типовые элементы, необходимо выделить:

- звездообразные ОСГ (см. рис. 2,б; рис. 3,б);
- кольцевые ОСГ (см. рис. 9,в);
- меандровые ОСГ (см. рис. 7,в);
- ленточные ОСГ (см. рис. 5,б, 6,б).

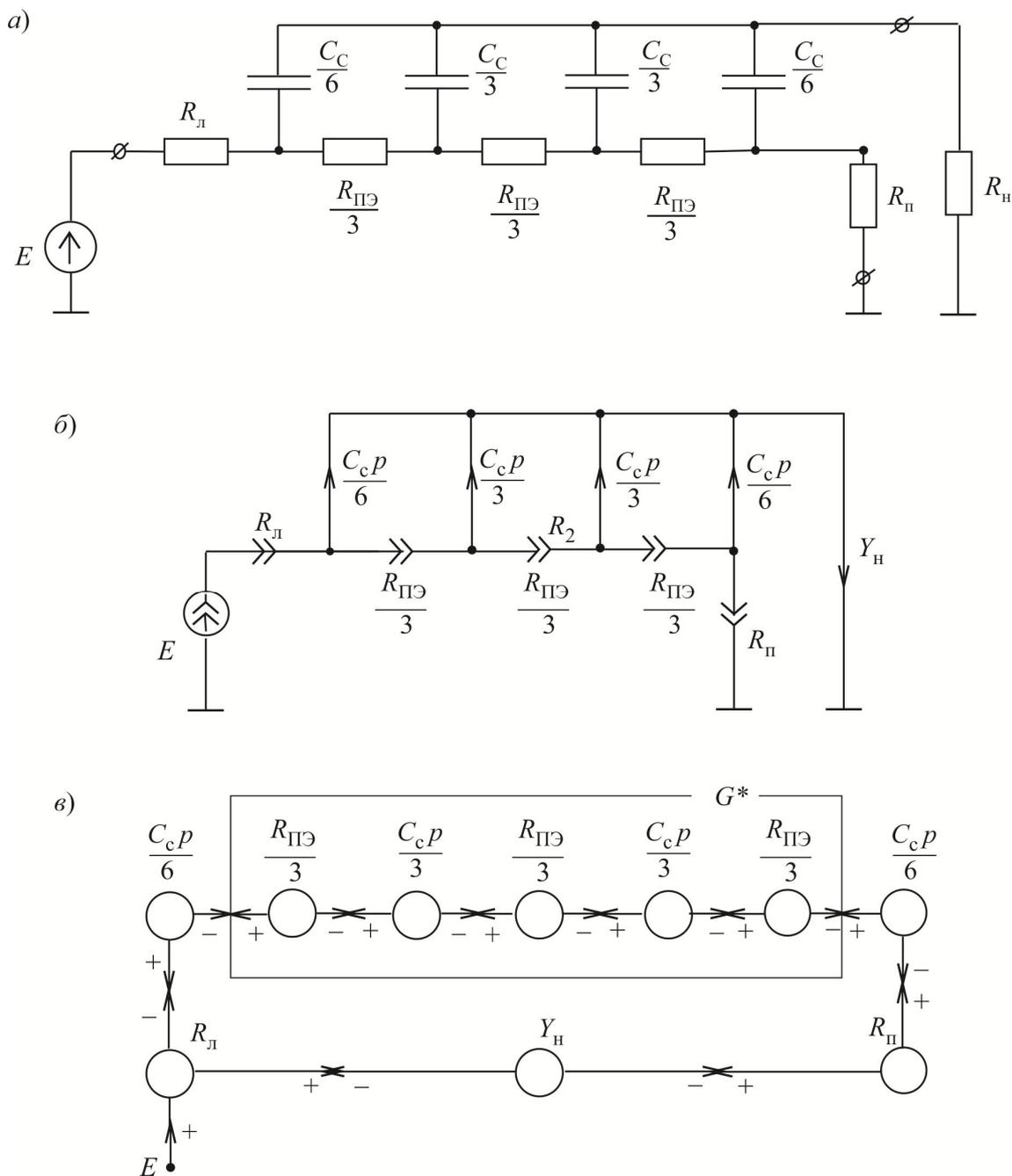


Рис. 9. Дискретная схема замещения РЕД (а) и соответствующие ей ПТГ (б) и ОСГ (в)

Для пассивных измерительных цепей рассматриваемые ОСГ характеризуются тем, что весовые коэффициенты дуг принимают значения  $\pm 1$ . В этом плане все их можно называть единичными.

Следует подчеркнуть, что не все структуры взаимно трансформируемы. Только меандровый ОСГ можно преобразовать в ленточный (путем исключения висячих вершин или подграфов). Звездообразный ОСГ можно преобразовать в кольцевой (путем исключения центральной вершины). Но если в первом случае ОСГ остается единичным, то при преобразовании «звезда-кольцо» появляются дуги с весами, отличными от  $\pm 1$ .

Среди всех приведенных типов ОСГ особое место занимают ленточные ОСГ, которые можно рассматривать как наиболее универсальные типовые элементы (домены), из которых могут быть сложены обобщенные сигнальные графы иных типов.

Следует отметить, что отображение структур измерительных цепей в виде ОСГ имеет практический интерес, поскольку они характеризуют реальные физические объекты (МДП-

структуры, линии сверхвысокого напряжения, датчики, преобразователи и т.п.) и упрощают расчет их параметров, используя топологические формулы для типовых измерительных цепей.

#### Библиографический список

1. Датчики : справочное пособие / В. М. Шарапов, Е. С. Полищук, Н. Д. Кошевой, Г. Г. Ишанин, И. Г. Минаев, А. С. Совлуков ; под общ. ред. В. М. Шарапова, Е. С. Полищука. – Москва : Техносфера, 2012. – 624 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. – 261 с.
3. *Чернецов, М. В.* Применение фазочастотных характеристик для идентификации схем замещения параметрических датчиков / М. В. Чернецов // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль.* – 2018. – № 2 (24). – С. 26–33.
4. *Добровинский, И. Р.* Структурно-параметрическая идентификация физических процессов в виде двухполосников / И. Р. Добровинский, А. И. Кислов, А. С. Кибиткин, С. Б. Шахов // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль.* – 2012. – № 1. – С. 26–34.
5. *Медведева, С. Н.* Анализ и синтез измерительных цепей датчиков с распределенными параметрами : дис. ... канд. техн. наук / Медведева С. Н. – Пенза, 2002. – 213 с.
6. *Анисимов, В. И.* Топологический расчет электронных схем / В. И. Анисимов. – Ленинград : Энергия, 1977. – 240 с.
7. *Сапельников, В. М.* Функциональные цифроаналоговые преобразователи и их роль в развитии приборостроения / В. М. Сапельников // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль.* – 2014. – № 1 (7). – С. 4–14.
8. *Бессонов, Л. А.* Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – 9-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высш. шк., 1996. – 638 с.
9. Использование топологических графов для расчета схем узлов средств измерений на операционных усилителях и анализа их погрешностей / И. Р. Добровинский, Е. А. Ломтев, Ю. Т. Медведик, П. М. Стеблев, А. А. Трофимов // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки.* – 2011. – № 1 (17). – С. 139–147.
10. *Чернецов, М. В.* Унифицирующие измерительные преобразователи физических величин на базе резистивно-емкостных датчиков : дис. ... канд. техн. наук / Чернецов М. В. – Пенза : ПГУ, 2001. – 215 с.
11. *Медведева, С. Н.* Моделирование линий задержки посредством обобщенных сигнальных графов / С. Н. Медведева, В. Д. Михотин, В. И. Чернецов // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество.* – 2006. – Т. 1. – С. 302–303.

#### References

1. Sharapov V. M., Polishchuk E. S., Koshevoy N. D., Ishanin G. G., Minaev I. G., Sovlucov A. S. *Datchiki: spravochnoe posobie* [Sensors : reference guide]. Moscow: Tekhnosfera, 2012, 624 p. [In Russian]
2. Martiyashin A. I., Kulikovskiy K. L., Kuroedov S. K., Orlova L. V. *Osnovy invariantnogo preobrazovaniya parametrov elektricheskikh tsepey* [Bases of invariant transformation of parameters of electric circuits]. Moscow: Energoatomizdat, 1990, 261 p. [In Russian]
3. Chernetsov M. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2018, no. 2 (24), pp. 26–33. [In Russian]
4. Dobrovinskiy I. R., Kislov A. I., Kibitkin A. S., Shakhov S. B. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2012, no. 1, pp. 26–34. [In Russian]
5. Medvedeva S. N. *Analiz i sintez izmeritel'nykh tsepey datchikov s raspredelennymi parametrami: dis. kand. tekhn. nauk* [Analysis and synthesis of sensor measuring circuits with distributed parameters : dis. ... cand. of techn. sciences]. Penza, 2002, 213 p. [In Russian]
6. Anisimov V. I. *Topologicheskij raschet elektronnykh skhem* [Topological calculation of electronic circuits]. Leningrad: Energiya, 1977, 240 p. [In Russian]
7. Sapel'nikov V. M. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2014, no. 1 (7), pp. 4–14. [In Russian]

8. Bessonov L. A. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Elektricheskie tsepi* [Theoretical foundations of electrical engineering. Electrical circuit]. 9th ed., rev. and updated. Moscow: Vyssh. shk., 1996, 638 p. [In Russian]
9. Dobrovinskiy I. R., Lomtev E. A., Medvedik Yu. T., Steblev P. M., Trofimov A. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2011, no. 1 (17), pp. 139–147. [In Russian]
10. Chernetsov M. V. *Unifitsiruyushchie izmeritel'nye preobrazovateli fizicheskikh velichin na baze rezistivno-emkostnykh datchikov: dis. kand. tekhn. nauk* [Unifying measuring converters of physical quantities on the basis of resistive-capacitive sensors : dis. ... cand. of techn. sciences]. Penza: PGU, 2001, 215 p. [In Russian]
11. Medvedeva S. N., Mikhotin V. D., Chernetsov V. I. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2006, vol. 1, pp. 302–303. [In Russian]

---

**Медведева Светлана Николаевна**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра электроэнергетики и электротехники,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: sn-medvedeva@yandex.ru

**Medvedeva Svetlana Nikolaevna**

candidate of technical sciences, associate professor,  
sub-department of electric power  
and electrical engineering,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Чернецов Владимир Иванович**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра прикладной и бизнес-информатики,  
Пензенский казачий институт технологий (филиал)  
Московского государственного университета  
технологий и управления имени К. Г. Разумовского  
(Первый казачий университет)  
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 6)  
E-mail: chvi.fortuna@mail.ru

**Chernetsov Vladimir Ivanovich**

doctor of technical sciences, professor,  
sub-department of applied and business informatics,  
Penza Cossack Institute of Technology (branch)  
of the Moscow State University of Technology  
and Management named after K. G. Razumovsky  
(First Cossack University)  
(6 Volodarskogo street, Penza, Russia)

**Чернецов Михаил Владимирович**

кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой технического  
управления качеством,  
Пензенский государственный  
технологический университет  
(Россия, г. Пенза, пр. Байдукова /  
ул. Гагарина, 1а/11)  
E-mail: kafedratuk@yandex.ru

**Chernetsov Mikhail Vladimirovich**

candidate of technical sciences, associate professor,  
head of sub-department of technical  
quality management,  
Penza State Technological University  
(1a/11 Baydukova passage/Gagarin street,  
Penza, Russia)

---

**Образец цитирования:**

Медведева, С. Н. Отображения типовых структур измерительных цепей в структуры обобщенных сигнальных графов / С. Н. Медведева, В. И. Чернецов, М. В. Чернецов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 2 (28). – С. 45–55. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-2-6.