

## О свойстве четырехполюсников четырех структур

ПЕРЕДЕЛЬСКИЙ Г.И., ШЕВЕЛЁВ С.С.

*Показана возможность получения четырехполюсников (ветвей) четырех структур с повторяющимися цепями наращивания. Она заключается в замене одиночного резистора в известных ветвях, обеспечивающих отдельное уравнивание только регулируемы́ми резисторами в мостовых электрических цепях с их использованием, на многоэлементный двухполюсник, эквивалентный многоэлементному двухполюснику, в упомянутой мостовой цепи. Обосновано следующее свойство полученных четырехполюсников: в случае использования в качестве питающих импульсов линейно изменяющейся формы, квадратичной, кубичной и т.д. принужденная составляющая с плоской вершиной в выходном импульсе четырехполюсников четырех структур при регулировании резистивных сопротивлений может принимать положительные, нулевые и отрицательные значения. Показано, что только четыре варианта структур четырехполюсников, обеспечивающих отдельное уравнивание в мостовых цепях с импульсным питанием, имеют конечное значение (не нулевое и не бесконечное) резистивного сопротивления на постоянном токе. Рассмотрен пример применения полученных четырехполюсников в мостовых цепях с импульсным питанием. Они обеспечивают и отдельное уравнивание только регулируемы́ми резисторами, и расширение функциональных возможностей мостовых цепей.*

*Ключевые слова: мостовая электрическая цепь, импульсное питание, четырехполюсник, цепь наращивания, регулируемые резисторы, функциональные возможности, пример применения*

Известны четырёхполюсники (ветви) [1, 2], которые в мостовых электрических цепях с импульсным питанием обеспечивают отдельное уравнивание только регулируемы́ми образцовыми резисторами. Такому уравниванию при прочих равных условиях отдают предпочтение, так как по показателям и характеристикам регулируемые образцовые резисторы превосходят регулируемые образцовые реактивные элементы (конденсаторы и индуктивные катушки). Можно, например, отметить, что изготовление первых является более технологичным, простым и дешёвым, у них выше класс точности, меньше габаритные размеры и масса, на них меньшее влияние оказывают электромагнитные поля и окружающая среда.

Известны мостовые цепи с расширенными функциональными возможностями [3], позволяющие без изменения их построения определять параметры  $R-C$ ,  $R-L$ , и  $R-L-C$  двухполюсников. Такое свойство мостам обеспечивает использование в ветвях (четырёхполюсниках) с уравнивающими элементами двух последовательно соединённых многоэлементных двухполюсников.

Мостовые цепи с расширенными функциональными свойствами не имеют возможности отдельного уравнивания только регулируемы́ми резисторами. Возникает задача в получении мостовых цепей и с отдельным уравниванием только регулируемы́ми резисторами, и с расширенными функциональными возможностями. Задача сводится к получению ветви с уравнивающими элементами (четырёхполюсника), которая обеспе-

чивает в мостовой цепи два приведённых выше свойства. Логически подтверждается то обстоятельство, что отдельное уравнивание мостовой цепи только регулируемы́ми резисторами, как обосновано в [1, 2], обеспечивает ветвь с регулируемы́ми элементами уравнивания. Расширение функциональных возможностей, как показано в [3], также определяет ветвь с регулируемы́ми уравнивающими элементами.

В статье поставлены задачи обоснования ветвей (четырёхполюсников) с регулируемы́ми элементами уравнивания, обеспечивающими в мостовых цепях и отдельное уравнивание только регулируемы́ми резисторами, и расширение функциональных возможностей, а также рассмотрения их свойств и примеров применения.

При выборе пути выполнения поставленных задач можно обратить внимание на то, что расширение функциональных возможностей мостовых цепей позволяет использовать в ветви с регулируемы́ми элементами уравнивания вместо одиночного резистора многоэлементный двухполюсник, эквивалентный двухполюснику объекта измерения [3]. Каждая из ветвей, обеспечивающих отдельное уравнивание мостовых цепей только регулируемы́ми резисторами [1, 2], также содержит одиночный резистор. Такой резистор можно заменить на многоэлементный двухполюсник, эквивалентный двухполюснику объекта измерения исходной мостовой цепи. Это предположение привело к положительному результату и решению поставленных задач.

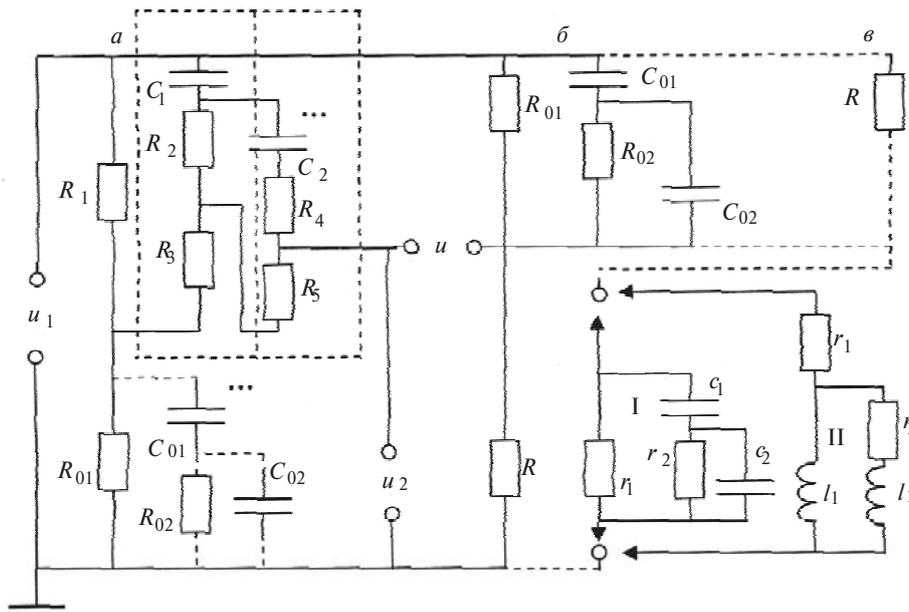


Рис. 1

В качестве исходной мостовой цепи взят, например, известный мост из [2], приведённый на рис. 1 сплошными линиями. В нём на каждом из четырёх этапов раздельное уравнивание осуществляется только регулируемыми четырьмя резисторами в приведённой последовательности:  $R_1, R_3, R_5, R_4$  [2]. На рис. 1 штриховыми линиями выделены цепи наращивания (в частности, цепи I и 2), показаны их содержание, подключение к мостовой цепи и соединение между собой. Ветвь моста с уравнивающими элементами на рис. 1 обозначена буквой *a*. Ветвь с двухполюсником объекта

контроля, диагностики, измерения или исследования – буквой *б*. Также штриховыми линиями отмечена ветвь, обозначенная буквой *в*, в которой местонахождение двухполюсника объекта контроля и одиночного резистора поменялись местами; смысл этой ветви объяснён ниже.

Ветвь *a* (рис. 1) с уравнивающими элементами мостовой цепи содержит одиночный резистор  $R_{01}$ . Для расширения функциональных возможностей его следует заменить на многоэлементный двухполюсник, в частности, одинаковый с двухполюсником объекта контроля в ветви *б*, причём по-

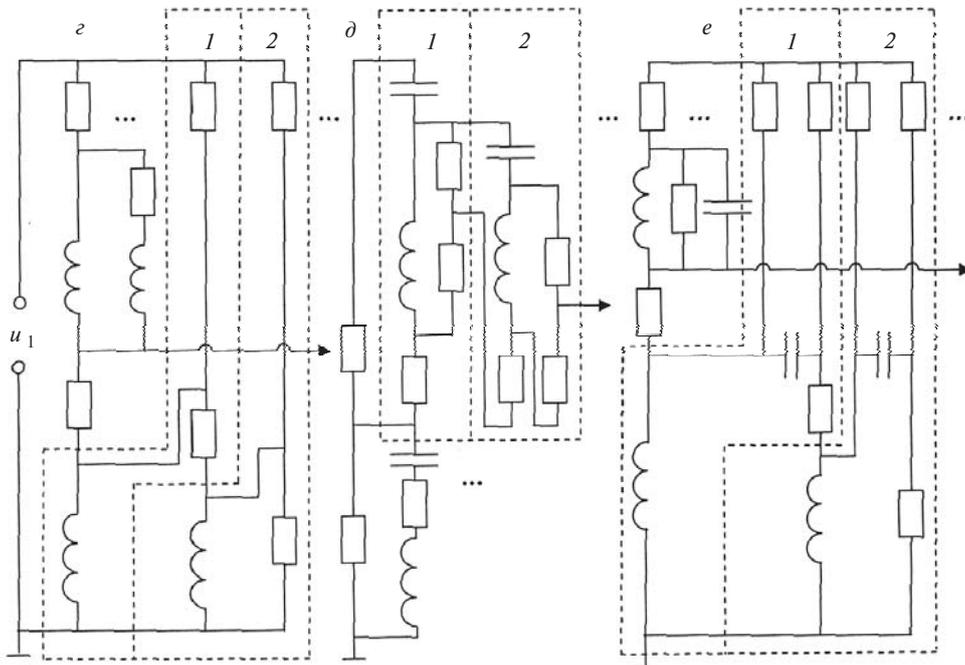


Рис. 2

следний двухполюсник включен смежно с многоэлементной цепью ветви  $a$ . Реально наряду с резистором  $R_{01}$  включаются три элемента:  $C_{01}$ ,  $R_{02}$  и  $C_{02}$ . Далее следует обосновать, что полученная ветвь расширяет функциональные возможности мостовой цепи.

В [3] показано, что для расширения функциональных возможностей мостовой цепи в импульсах выходного напряжения ветви с уравнивающими элементами принужденная составляющая с плоской вершиной должна иметь возможность принимать положительное значение напряжения, нулевое или отрицательное при регулировании соответствующего уравнивающего параметра. Это должно быть справедливо при питании ветвей импульсами напряжения линейно изменяющейся формы, квадратичной, кубической и т.д., что можно отобразить неравенствами:

$$U_{2i} > 0; U_{2i} = 0; U_{2i} < 0, \quad (1)$$

где  $U_{2i}$  – принужденная составляющая с плоской вершиной в выходном напряжении ветви (рис. 1,  $a$ ) при воздействии на неё импульса линейно изменяющейся формы ( $i=1$ ), квадратичной ( $i=2$ ), кубической ( $i=3$ ),...

В обобщенном виде выходное напряжение ветви (рис. 1,  $a$ ) в операторной форме определяется известным выражением:

$$u_2(p) = u_1(p) \frac{D_0 + pD_1 + p^2D_2 + p^3D_3}{f(p)}, \quad (2)$$

где  $u_1(p)$  – питающее ветвь напряжение;

$$f(p) = a_0 + pa_1 + p^2a_2 + p^3a_3; \quad (3)$$

$D_i$  и  $a_i$  – обобщенные коэффициенты, определяемые параметрами электрической цепи.

Большая часть обобщенных коэффициентов выражается через параметры электрической цепи громоздкими формулами. Для того чтобы этого избежать, введены дополнительные коэффициенты (повторяющиеся фрагменты формулы):

$$\begin{aligned} g_1 &= R_1 + R_2 + R_3; & g_2 &= R_2 + R_4 + R_5; \\ e_1 &= g_2 R_3 + R_2 R_5; & e_2 &= R_{01} R_1 + R_{01} R_3 + R_1 R_3; \\ x_1 &= C_1 g_1 + C_2 g_2; & x_2 &= C_{01} R_{01} + C_{01} R_{02} + \\ & & & + C_{02} R_{02}; & x_3 &= R_{02} (C_{01} + C_{02}); & x_4 &= C_1 R_2 + C_2 g_2, \end{aligned} \quad (4)$$

и выражения обобщенных коэффициентов принимают вид:

$$\begin{aligned} D_{01} &= R_{01}; & D_1 &= R_{01}(x_1 + x_2) + C_1 R_1 R_3; \\ D_2 &= C_1 C_2 [g_2 e_2 + R_2 (R_{01} R_4 + R_{01} R_5 + \\ & & + R_1 R_5)] + R_{01} x_1 x_3 + C_1 R_1 R_3 x_2; \\ D_3 &= C_1 \{R_{01} C_2 x_3 [g_2 (R_1 + R_3) + R_2 (R_4 + R_5)] + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + R_1 C_2 x_1 x_2 + C_{01} C_{02} R_{01} R_{02} R_3 \}; \\ D_4 &= C_1 C_2 C_{01} C_{02} R_1 R_{01} R_2 e_1; \\ a_0 &= D_0 + R_1; & a_1 &= D_1 + R_1 (x_2 + x_4); \\ a_2 &= D_2 + R_1 (C_1 C_2 R_1 R_2 + C_{01} C_{02} R_{01} R_{02} + x_2 x_4); \\ a_3 &= D_3 + R_1 (C_1 C_2 R_2 R_4 x_2 + C_{01} C_{02} R_{01} R_{02} x_4); \\ a_4 &= D_4 + C_1 C_2 C_{01} C_{02} R_{01} R_{02} R_1 R_2 R_4. \end{aligned} \quad (5)$$

В обобщенном виде принужденные составляющие с плоскими вершинами выходного напряжения ветви (рис. 1, ветвь  $a$ ) описываются выражениями:

при питающем импульсе линейно изменяющегося напряжения

$$U_{21} = \frac{U_1 a_0 D_1 - D_0 a_1}{t_{и} a_0^2}; \quad (6)$$

при квадратичном импульсе

$$U_{22} = \frac{2U_1}{t_{и}^2 a_0^2} [a_0(a_0 D_2 - D_0 a_2) - a_1(a_0 D_1 - D_0 a_1)]; \quad (7)$$

при кубическом импульсе

$$\begin{aligned} U_{23} &= \frac{6U_1}{t_{и}^3 a_0^4} [a_0^2 (a_0 D_3 - D_0 a_3) - a_0 a_1 (a_0 D_2 - D_0 a_2) + \\ & + (a_1^2 - a_0 a_2) (a_0 D_1 - D_0 a_1)], \end{aligned} \quad (8)$$

где  $U_1$  – амплитуда питающих импульсов;  $t_{и}$  – их длительность.

Все параметры ветви  $a$  являются пассивными и имеют только положительные знаки. Поэтому также положительные знаки имеют все дополнительные (4) и обобщенные (5) коэффициенты. С учетом (5) выражение принужденной составляющей с плоской вершиной выходного напряжения через параметры ветви  $a$  (рис. 1) при использовании питающих импульсов линейно изменяющейся формы имеет вид

$$U_{21} = \frac{U_1 R_1 [C_1 (R_{01} R_1 + R_{01} R_3 + R_1 R_3) - C_{01} R_{01}^2]}{t_{и} (R_1 + R_{01})^2}. \quad (9)$$

При воздействии импульса прямоугольной формы после окончания переходного процесса выходное напряжение ветви имеет плоскую вершину, напряжение которой определяется сопротивлениями  $R_1$  и  $R_{01}$ . В будущей мостовой цепи на основе ветви, приведенной на рис. 1, при уравнивании регулируемый элемент, например  $R_1$ , приводится к определенному значению, и выполняется первое условие равновесия моста. В дальнейшем нельзя изменять значения сопротивлений  $R_1$  и  $R_{01}$ , чтобы не нарушить ранее выполненного условия равновесия моста. Значения параметров  $C_1$  и  $C_{01}$  в (9)

можно выбирать, а  $R_3$  регулировать, чтобы обеспечить три варианта (1) значений напряжения составляющей с плоской вершиной выходного напряжения ветви. При положительной полярности питающих импульсов ( $U_1 > 0$ ) для обеспечения всех трёх вариантов значений, очевидно, следует выполнить условия:

$$\begin{aligned} C_1(R_{01}R_1 + R_{01}R_3 + R_1R_3) &> C_{01}R_{01}^2; \\ C_1(R_{01}R_1 + R_{01}R_3 + R_1R_3) &= C_{01}R_{01}^2; \\ C_1(R_{01}R_1 + R_{01}R_3 + R_1R_3) &< C_{01}R_{01}^2. \end{aligned} \quad (10)$$

При этом можно примерно в среднем значении заданного или выбранного диапазона сопротивления  $R_3$  выбором значений ёмкостей  $C_1$  и  $C_{01}$  обеспечить выполнение равенства (10). В случае увеличения значения сопротивления  $R_3$  выполняется первое неравенство в (10), а в случае уменьшения – последнее.

Обосновать три варианта значений принуждённой составляющей с плоской вершиной (1) в выходном сигнале ветви  $a$  на рис. 1 при питающих импульсах линейно изменяющейся формы довольно просто, более сложно это сделать в случае питающих импульсов последующих форм. Для примера остановимся на использовании питающих импульсов квадратичной формы (7).

Полагаем, что второе слагаемое в квадратных скобках (7) имеет малое значение, слабо влияющее на результирующее значение напряжения  $U_{22}$ . Это начальное условие. Тогда три варианта значений этого напряжения определяются в основном выражением в круглых скобках первого слагаемого (7). Выраженное через параметры элементов ветви (4) и (5) оно определяется по формуле

$$\begin{aligned} a_0D_2 - D_0a_2 = R_1(C_{02}R_{02} + C_2g_2)[C_1(R_{01}R_1 + \\ + R_{01}R_3 + R_1R_3) - C_{01}R_{01}^2] + C_1R_1\{C_2R_2R_5(R_1 + \\ + R_{01}) + C_{01}[R_{01}R_{02}(R_1 + R_3) + R_1R_3(R_{01} + R_{02}) - \\ - R_{01}^2R_2]\}. \end{aligned} \quad (11)$$

Выражение в квадратных скобках первого слагаемого в соответствии с (6), (7) и (9) тоже имеет малое неопределяющее значение. Поэтому при приведённом выше начальном условии знаки (11) и напряжения  $U_{22}$  (7) определяются выражением в фигурных скобках второго слагаемого (11). Для этого можно использовать параметры элементов  $C_2$ ,  $R_2$  и  $R_5$ . Один из них ( $R_5$ ) является регулируемым элементом уравнивания. Вначале выбором значения сопротивления  $R_2$  придается отрицательное значение выражению в квадратных скобках второго слагаемого в (11):

$$R_{01}R_{02}(R_1 + R_3) + R_1R_3(R_{01} + R_{02}) < R_{01}^2R_2. \quad (12)$$

Далее берется малое (или даже нулевое) значение сопротивления  $R_5$ , чтобы выражение в фигурных скобках второго слагаемого (11) также имело отрицательный знак; при необходимости можно также уменьшить значение ёмкости  $C_2$ .

Плавным увеличением значения  $R_5$  достигаются и нулевое, и положительное значения выражения в фигурных скобках (11). В итоге при приведённом выше начальном условии получается такой же результат и для всего выражения (11), и для напряжения  $U_{22}$  (7). Диапазон отрицательных и положительных значений (11) можно увеличить, повышая степень выполнения неравенства (12) увеличением значения  $R_2$ , уменьшением ёмкости  $C_2$  (11) и увеличением диапазона регулирования сопротивления  $R_5$  (11). При этом увеличивается диапазон отрицательных и положительных значений напряжения  $U_{22}$  (7).

Если расширения диапазона отрицательных и положительных значений недостаточно, то можно повторно изменять значения параметров, указанных в предыдущем абзаце. В итоге можно получить настолько широкий диапазон, что при использовании питающих импульсов квадратичной формы и регулировании значения уравнивающего сопротивления  $R_5$  принуждённая составляющая с плоской вершиной  $U_{22}$  в выходном напряжении ветви  $a$  (рис. 1) будет принимать три варианта значений (положительное, нулевое и отрицательное) и при невыполнении начального условия, приведённого выше.

Аналогично обосновываются три варианта значений напряжения принуждённой составляющей с плоской вершиной при регулировании значения последующего уравнивающего параметра и при использовании импульсов последующих форм, соответствующих степенным функциям времени, для питания ветви  $a$  (рис. 1), в том числе с цепями наращивания больше двух.

Четырёхполюсники на рис. 2 обладают таким же свойством, как и четырёхполюсник (ветвь) на рис. 1. Четырёхполюсник на рис. 2 (г) получен на основе резистивно-индуктивного четырёхполюсника [2] заменой одиночного резистора на резистивно-индуктивный многоэлементный двухполюсник. В нём для примера показаны две цепи наращивания, выделенные штриховыми линиями. Для получения четырёхполюсников на рис. 2 (д и е) в качестве исходных взяты два четырёхполюсника, приведённые в [1]; в них также выделены по две цепи наращивания. В обсуждаемых четырёхполюсниках регулируемые резисторы остаются такими же, что и в исходных четырёхполюсниках.

Для обсуждения можно предложить следующую формулировку свойства четырёхполюсников. При использовании в качестве питающих импульсов

линейно изменяющейся формы, квадратичной, кубической и т.д. принужденная составляющая с плоской вершиной в выходном импульсе четырехполюсников четырех структур при регулировании значений резистивных сопротивлений может принимать три варианта значений: положительные, нулевое и отрицательные.

Исходные четырехполюсники (ветви) [1, 2], на основе которых получены четырехполюсники с цепями наращивания на рис. 1 и 2, используются в мостовых электрических цепях. Поэтому обсуждаемые здесь варианты четырехполюсников также можно применять в мостовых цепях. Они позволяют расширить функциональные возможности с сохранением раздельного уравнивания и других положительных показателей мостовых цепей с импульсным питанием [1–3].

Для примера на рис. 1 приведена мостовая цепь на основе полученной ветви *a* (рис. 1). Кроме ветви *a*, она включает ветвь *в*, ветвь *б* исключена. В выходном импульсе ветви *a* (первой ветви) напряжения принужденных составляющих с плоской вершиной могут принимать три варианта значений. Это дает возможность произвольно выбирать место расположения во второй ветви моста двухполюсника объекта контроля, диагностики, измерения или исследования и одиночного элемента. Используя это, в ветви *в* изменено место расположения одиночного элемента и двухполюсника объекта контроля по сравнению с ветвью *б*, так как при прочих равных условиях на практике отдают предпочтение мостам с заземленными объектами контроля. Ветвь *в* образует вторую ветвь мостовой цепи. Для того чтобы подтвердить расширение функциональных возможностей мостовых цепей, достаточно использовать в объектах контроля обратные (инверсные) двухполюсники, в частности двухполюсники I и II на рис. 1.

Мостовая цепь на рис. 1 (*a* и *в*) уравнивается в четыре этапа. На каждом из них питание осуществляется импульсными сигналами одной из форм в следующей последовательности: прямоугольной, линейно изменяющейся, квадратичной и кубической, и последовательно выполняется одно из четырех условий равновесия:

$$\begin{aligned} A_i &= 0; \quad A_1 = RR_{01} - r_1 R_1; \\ A_2 &= C_1 e_2 - R_{01}(C_{01}R_{01} - c_1 r_1); \\ A_3 &= C_1 [e_2(C_{01}R_{02} + x_5) + q_1] - R_{01} [C_{01}R_{01} \cdot \\ & \cdot (C_1 R_2 + c_1 r_2) - c_1 r_1 (C_1 R_2 - C_{01}R_{02})]; \\ A_4 &= C_1 \{e_2(C_2 g_2(c_1 r_2 + x_6) + x_3 x_5 + c_2 r_2 x_6) + \\ & + q_1(x_5 + x_7) + C_{01}C_2[R_{02}R_2R_5(R_1 + R_{01}) + \\ & + e_1 R_1 R_{01}]\} + R_{01} \{C_1 R_2(C_2 R_4 + x_7)(c_1 r_1 - C_{01}R_{01}) - \\ & - c_1 C_{01}[R_{01}r_2(C_{02}R_{02} + x_4) - r_1 R_{02}(c_2 r_2 + x_4)]\}. \end{aligned} \quad (14)$$

Здесь для менее громоздкого представления математического отображения условий равновесия использованы коэффициенты (4) и дополнительные коэффициенты для мостовой цепи на рис. 1 (*a* и *в*):

$$\begin{aligned} x_5 &= c_1(r_1 + r_2); \quad x_6 = c_1 r_1 + C_{01}R_{02}; \\ x_7 &= c_2 r_2 + C_{02}R_{02}; \\ q_1 &= C_2 R_2 R_5(R_1 + R_{01}) + C_{01}R_{01}R_1 R_3. \end{aligned} \quad (15)$$

На каждом из четырех этапов импульсное напряжение в измерительной диагонали мостовой цепи (её выходное напряжение) имеет плоскую вершину [1–3] в интервале времени от окончания переходного процесса до окончания питающего импульса. Каждый раз напряжение плоской вершины приводится к нулю однократной регулировкой соответствующего уравнивающего элемента (резистора) в последовательности:  $R_1, R_3, R_5, R_4$ . Регулировка каждого последующего резистора не приводит к нарушению предыдущего или предыдущих условий равновесия, так как его сопротивление не входит в (4), (14), (15).

В основе раздельного уравнивания рассмотренной мостовой цепи, как и исходных мостов в [1–3], два положения: использование в качестве питающих импульсов с изменением напряжения по закону степенных функций и использование в качестве ветви с элементами уравнивания четырехполюсника с обоснованным свойством.

Резистивно-индуктивный двухполюсник II объекта контроля в ветви *в* на рис. 1 является обратным относительно резистивно-ёмкостного двухполюсника I. При использовании двухполюсника II мостовая цепь на рис. 1 (*a* и *в*) уравнивается также в четыре этапа. Сохраняются те же питающие импульсные сигналы и прежние регулируемые уравнивающие резисторы, а также последовательность их регулирования. Условия равновесия такой мостовой цепи:

$$\begin{aligned} A_1 &= RR_{01} - r_1 R_1; \quad A_2 = C_1 R e_2 - R_1(l_1 - C_{01}R_{01}r_1); \\ A_3 &= C_1 R q_1 r_2 + l_1 R_1 [l_1 - C_{01}r_2(R_{01} + R_{02})] - \\ & - R_1 r_2 y_1 (C_1 R_2 - C_{01}R_{02}); \\ A_4 &= C_1 C_2 R [g_2 e_2 y_1 + R_2 R_5(R_1 x_2 + R_{02} x_3) + \\ & + C_1 R [q_1(l_1 + l_2) + C_{01}R_{01}R_1 R_3 r_2(C_{02}R_{02} + \\ & C_2 g_2) + e_2(l_1 x_3 + l_2 C_{01}R_{02})] - \\ & - C_1 y_1 R_1 R_2 [l_2 + r_2(C_2 R_4 + C_{02}R_{02})] - \\ & - l_1 C_{01}R_1 [(R_{01} + R_{02})(l_2 + r_2 x_4) + \\ & + r_1 R_{01}(C_1 R_3 + C_{02}R_{02} + x_4)], \end{aligned} \quad (16)$$

где  $y_1 = l_1 + C_{01}R_{01}r_1$ .

Отсчёт искомым параметров объектов контроля I и II (рис. 1) берется из условий равновесия (13), (14) и (16). По существу из четырёх уравнений (условий равновесия) определяются значения четырёх неизвестных параметров. Мостовые цепи на основе обсуждаемых четырёх ветвей  $a$ ,  $z$ ,  $d$  и  $e$  на рис. 1 и 2, как и исходные электрические мосты [1–3], являются квазиуравновешенными мостами.

Рассматриваемые четырёхполюсники получены с использованием исходных четырёхполюсников из [1, 2], построенных на основе двухполюсников определённых структур, приведённых в [4], которые обеспечивают раздельное уравнивание мостовых цепей с импульсным питанием. При этом пригодны двухполюсники с конечным резистивным значением сопротивления на постоянном токе (не нулевым и не бесконечным). В противном случае и в обсуждаемых четырёхполюсниках, и в исходных отсутствует резистор, регулированием сопротивления которого уравнивается на первом этапе мостовая цепь на основе таких четырёхполюсников. Среди вариантов четырёхполюсников определённых структур [4] только четыре имеют конечное сопротивление на постоянном токе. Это резистивно-ёмкостный двухполюсник, у которого в первой цепи наращивания (ячейке) отсутствует конденсатор, резистивно индуктивный двухполюсник с полной первой цепью наращивания и двухполюсник с разнородными реактивными элементами при отсутствии в первой цепи наращивания элементов в двух вариантах. В первом варианте отсутствует один элемент — конденсатор, во втором — три элемента: конденсатор, первый резистор и катушка индуктивности. Четыре приведённых ва-

риантов определяют четыре структуры обсуждаемых четырёхполюсников.

Варианты обсуждаемых четырёхполюсников и мостовых цепей с их использованием моделировались на ЭВМ с помощью программы Multisim 9 и проверялись на реальных макетах. Испытания подтвердили наличие у четырёхполюсников рассмотренного в статье свойства, а у мостовых цепей с расширенными функциональными возможностями — раздельное уравнивание только регулируемые резисторами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Передельский Г.И.** К свойству четырёхполюсников с одинаковыми повторяющимися ячейками, содержащими разнородные реактивные элементы. — Известия вузов. Электромеханика, 2014, № 2, с. 16–22.
2. **Передельский Г.И.** Многоплечие мостовые цепи с уравниванием регулируемые резисторами. — Измерительная техника, 1999, № 6, с. 50–54.
3. **Захаров И.С., Иванов В.И., Передельский Г.И.** Мостовые электрические цепи с расширенными функциональными возможностями. — Электричество, 2009, № 9, с. 26–31.
4. **Передельский Г.И.** О свойстве многоэлементных электрических цепей. — Электричество, 1989, № 2, с. 73–75.

[22.07.15]

*А в т о р ы: Передельский Геннадий Иванович окончил в 1960 г. радиотехнический факультет Томского политехнического института. В 1989 г. защитил докторскую диссертацию в Московском энергетическом институте по теории мостовых цепей с питанием импульсами сложной формы для измерения параметров двухполюсников. Профессор кафедры электротехники, электроники и автоматики Юго-Западного государственного университета (ЮЗГУ).*

*Шевелёв Сергей Степанович окончил в 1987 г. приборостроительный факультет Курского политехнического института. В 1995 г. в Курском государ-*

*Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 12, pp. 45–51.*

## About the Property of Two-Ports with Four Structures

**PEREDEL'SKII Gennadii Ivanovich** (South-West State University (SWSU), Kursk, Russia) — Professor, Dr.Sci. (Eng.)

**SHEVELEV Sergei Stepanovich** (SWSU), Rursk, Russia) — Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

*The possibility of obtaining two-ports (branches) of four structures with repeating extension circuits is shown. This possibility consists in replacing a single resistor in the known branches, separate balancing in which is achieved only by means of adjustable resistors in bridge electric circuits in which such resistors are used, by a multielement two-pole equivalent to the multielement two-pole in the above-mentioned bridge circuit. The following property of the obtained two-ports is substantiated: in case of using feed impulses with a linearly varying shape (quadratic, cubic, etc.), the forced component with a flat top in the output impulse of two-ports with four structures in adjusting the resistor values may take positive, zero and negative values. It is shown that only four versions of two-port structures ensuring separate balancing in bridge circuits with impulse power supply have a finite value (other than zero and infinite) of the DC resistance. An example of using the obtained two-ports in bridge circuits with impulse power supply is considered. The use of such two-ports makes it possible to achieve both separate balancing only by means of adjustable resistors and extension of the functional capacities of bridge circuits.*

*Key words: bridge electric circuit, impulse power supply, two-port, extension circuit, adjustable resistors, functional capacities, application example*

## REFERENCES

1. **Peredel'skii G.I.** *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika – in Russ. (News of Higher Education Institutions – Electrical Mechanics)*, 2014, No. 2, pp. 16–22.

2. **Peredel'skii G.I.** *Izmeritel'naya tekhnika – in Russ. (Measuring technology)*, 1999, No. 6, pp. 50–54.

стvenном техническом университете защитил кандидатскую диссертацию «Специализированные устройства обработки символьной информации». Доцент кафедры защиты информации и систем связи ЮзГУ, докторант.

3. **Zakhariv I.S., Ivanov V.I., Peredel'skii G.I.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2009, No. 9, pp. 26–31.

4. **Peredel'skii G.I.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1989, No. 2, pp. 73–75.