

О свойстве многоэлементных двухполюсников трех структур

ПЕРЕДЕЛЬСКИЙ Г.И.

Обосновано свойство многоэлементных двухполюсников трех структур и двухполюсников, производных от этих основных структур. Приведено его применение в мостовых электрических цепях с раздельным уравниванием только заземленными регулируемыми уравнивающими элементами.

Ключевые слова: *двухполюсник, мостовая цепь, условия равновесия, уравнивающий параметр*

В [1] обосновано свойство многоэлементных двухполюсников определенных структур и двухполюсников производных от этих структур. Сущность свойства заключается в следующем: при воздействии электрических сигналов, изменяющихся во времени по закону степенных функций, на двухполюсники $CRLR$ -, CR -, LR -структур и их производные напряжение или ток в них после окончания переходного процесса в выбранном интервале времени не зависят от значений параметров определенной совокупности элементов со сколь угодно малой наперед заданной ошибкой. Такие двухполюсники нашли применение в мостовых электрических цепях с импульсным питанием (например [2–4]). Они обеспечили в них такое важное свойство, как раздельное уравнивание. Число мостов с таким свойством получилось настолько большое, что отпала необходимость в мостовых цепях с отсутствием такого свойства.

В мостовых цепях с импульсным питанием следует выбирать регулируемые уравнивающие элементы (резисторы, конденсаторы и индуктивные катушки) в двухполюсниках с названным свойством. Такой двухполюсник включается в одно из плеч моста. При этом, в принципе, не удастся заземлять один из выводов примерно у половины регулируемых уравнивающих элементов, а тем более у всех таких элементов.

Образцовые регулируемые уравнивающие элементы имеют существенно большие размеры, чем элементы с постоянным значением параметра, поэтому и паразитные емкости этих элементов относительно земли тоже значительно больше. Паразитные емкости предопределяют соответствующую составляющую погрешности измерения. Нестабильность паразитных емкостей обуславливает также дополнительную составляющую погрешности измерения, так как они существенно изменяются с

The property of multicomponent two-poles of three structures and two-poles derived from these main structures is substantiated. The application of this property in bridge electric circuits with separate balancing by means of only grounded controlled balancing elements is considered.

Key words: *two-pole, bridge circuit, equilibrium conditions, balancing parameter*

течением времени (например от старения) и особенно сильно — с изменением температуры. На незаземленные регулируемые уравнивающие элементы значительно сильнее влияют электрические помехи и наводки. Для ослабления такого вредного влияния уравнивающие элементы нередко экранируют, тогда, если эти элементы не заземлены, возникает вопрос, с какой вершиной электрического моста лучше соединять экраны? При этом каждый из имеющихся вариантов соединения экранов не является безупречным. Если же названные элементы заземлены, то очевидно, что экраны следует заземлять.

В случае регулирования незаземленных уравнивающих элементов путем использования, например, матрицы резисторов, электронных ключей и управляющих электрических сигналов с электронного блока управления возникают дополнительные трудности. Они появятся в связи с тем, что электрический сигнал передается от заземленного электронного блока управления к незаземленным электронным ключам. Тогда приходится вводить развязывающие элементы (трансформаторы, оптронные пары). При заземленных уравнивающих элементах такие трудности отсутствуют. В мостовых устройствах при прочих равных условиях предпочтение отдается мостовым цепям с наибольшим числом заземленных регулируемых элементов уравнивания и лучшим вариантом является такой, где заземлен один из двух выводов всех таких элементов.

Важным условием обеспечения раздельного уравнивания в мостовых цепях является то, что в плече моста с уравнивающими элементами должен быть двухполюсник, совпадающий с одной из структур, рассмотренных в [1]. В таких двухполюсниках содержатся элементы или двух (C и R или R и L), или трех типов (C , R и L). В дан-

ной статье поставлена задача обосновать существование двухполюсников таких структур, где обязательно имеется элемент каждого типа, у которого заземлен один из двух его выводов. Эту задачу следует решить без излишнего усложнения структур двухполюсников при сохранении свойства раздельного уравнивания в мостовых электрических цепях с использованием двухполюсников таких структур.

Обратимся вначале к известным из [1] двухполюсникам CR-структуры (рис. 1,а). Эта структура показана сплошными линиями. Она состоит из одинаковых CR-цепей наращивания (ЦН—ячеек). В каждой ЦН резистор является заземленным, но нет возможности заземлять один из выводов конденсаторов. Относительно простым для решения поставленной задачи является предложение ввести в каждую ЦН дополнительный конденсатор, один из выводов которого заземлен. Это приводит к положительному результату. В рассматриваемой электрической цепи, кроме ее начальной части, свободные выводы дополнительно вводимых конденсаторов возможно соединять только с общим выводом резистора и имеющегося конденсатора. Подключение дополнительных конденсаторов на рис. 1 показано штриховыми линиями.

В результате каждая ЦН станет содержать три элемента: два конденсатора C_{1i}, C_{2i} и резистор R_i , где i – порядковый номер ЦН. Для каждой ЦН общий вывод двух конденсаторов образует первый вывод ее входа, а общий вывод дополнительного конденсатора и резистора – второй вывод входа. Выход ЦН остался прежним, его образуют два вывода имеющегося резистора. Каждая последующая

ЦН подключается параллельно резистору предыдущей ЦН.

При воздействии линейно изменяющегося напряжения на приведенную электрическую цепь (рис. 1,а) протекающий ток описывается выражением

$$i = \frac{U_1}{t_1} \left[C_{11} + C_{21} + \sum_{i=1}^2 \frac{F(p_i)}{p_i f'(p_i)} e^{p_i t} \right], \quad (1)$$

где

$$F(p) = D_0 + pD_1 + p^2 D_2; \quad f(p) = a_0 + a_1 p + a_2 p^2; \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} D_0 &= C_{11} + C_{21}; \\ D_1 &= R_1 [C_{11}C_{21} + (C_{11} + C_{21})(C_{12} + C_{22})] + \\ &+ R_2 C_{22} (C_{11} + C_{12}); \\ D_2 &= R_1 R_2 C_{22} (C_{11}C_{21} + C_{11}C_{12} + C_{21}C_{12}); \\ a_0 &= 1; \\ a_1 &= R_1 (C_{21} + C_{12} + C_{22}) + R_2 C_{22}; \\ a_2 &= R_1 R_2 C_{22} (C_{21} + C_{12}); \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

p_i – корни уравнения $f(p)=0$; t – текущее время; U_1 – напряжение воздействующего сигнала в некоторый момент времени t_1 .

После окончания переходного процесса при сравнительно большом значении времени $t=t_2$ электрический ток почти не зависит от значений параметров R_1, C_{12}, C_{22} и R_2 . При этом абсолютная ошибка

$$\Delta i = \frac{U_1}{t_1} \sum \frac{F(p_i)}{p_i f'(p_i)} e^{p_i t_2} \quad (4)$$

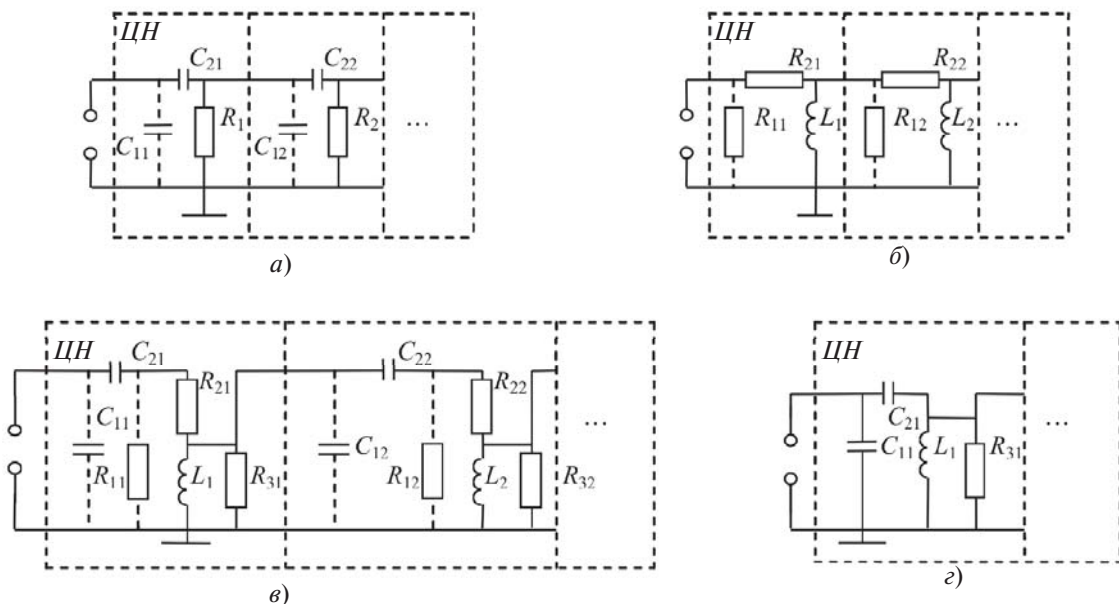


Рис. 1

и ее значение тем меньше, чем в большей степени выполняется неравенство

$$t_2 \gg \left| 1 / p_{\min} \right|, \quad (5)$$

где p_{\min} – наименьший из имеющихся корней.

Выбором времени t_2 можно обеспечить абсолютную ошибку меньше любого малого наперед заданного значения.

Если на двухполюсник (рис. 1,а) подается импульс напряжения, изменяющегося во времени по закону второй степени, то электрический ток определяется выражением

$$i = \frac{2U_1}{t_1^2} \left[(C_{11} + C_{21})t + R_1 C_{21}^2 + \sum_{i=1}^2 \frac{F(p_i)}{p_i^2 f'(p_i)} e^{p_i t} \right]. \quad (6)$$

При выполнении неравенства (5) значение тока почти не зависит от значений параметров C_{12} , C_{22} и R_2 . Выражение для абсолютной ошибки аналогично (4) и представляет собой произведение общего множителя в (6) и последнего слагаемого в квадратных скобках.

В случае воздействия импульса напряжения, изменяющегося во времени по закону третьей степени, ток находится по формуле

$$i = \frac{6U_1}{t_1^3} \left[(C_{11} + C_{21}) \frac{t^2}{2} + R_1 C_{21}^2 t + R_1^2 C_{21}^2 (C_{21} + C_{12} + C_{22}) + \sum_{i=1}^2 \frac{F(p_i)}{p_i^3 f'(p_i)} e^{p_i t} \right], \quad (7)$$

из которой следует, что после окончания переходного процесса ток практически не будет зависеть от значения сопротивления R_2 . Таким образом, при воздействии на рассматриваемый двухполюсник (рис. 1,а) электрических сигналов с напряжением, изменяющимся по закону степенных функций, ток в цепи после окончания переходного процесса не будет зависеть от значений определенной совокупности параметров.

Анализ показал, что рассмотренное свойство сохраняется у двухполюсников (рис. 1,а) CR -структуры с произвольным числом ЦН. Поэтому при воздействии линейно изменяющегося напряжения ток цепи после окончания переходного процесса не зависит от R_1 и значений параметров всех последующих ЦН. Если на двухполюсник подается импульс напряжения, изменяющегося во времени по закону второй степени, то ток не зависит от значений параметров всех последующих ЦН, кроме первой. И т.д.

Если на двухполюсник рассматриваемой структуры подаются электрические сигналы с током, изменяющимся по закону степенных функций, то по-

сле окончания переходного процесса в данном случае напряжение тоже не зависит от значений параметров определенной совокупности элементов. Так, при воздействии тока, изменяющегося по линейному закону, напряжение на двухполюснике рис. 1,а

$$u = \frac{I_1}{t_1 (C_{11} + C_{21})} \left\{ \frac{t^2}{2} + \frac{R_1 C_{21}^2 t}{(C_{11} + C_{21})} - \frac{R_1 C_{21}^2 [C_{11} C_{21} + (C_{11} + C_{21})(C_{12} + C_{22})]}{(C_{11} + C_{21})^2} + \sum_{i=1}^2 \frac{F(p_i)}{p_i^3 f'(p_i)} e^{p_i t} \right\} \quad (8)$$

после окончания переходного процесса почти не зависит от значения сопротивления R_2 и значений параметров всех последующих ЦН.

В двухполюснике (рис. 1,а) ЦН могут быть неполными. В первой из них могут отсутствовать конденсаторы C_{11} и C_{21} , а в последней j -й ЦН – конденсатор C_{2j} и резистор R_j . Недопустимо отсутствие в ЦН только резистора R_i и в промежуточных ЦН – C_{2j} .

Изучение рассматриваемой области выявило, что обсуждаемым свойством обладают три структуры двухполюсников. Это приведенная выше CR -структура, а также RL -структура, изображенная на рис. 1,б, и $CRLR$ -структура (рис. 1,в). Вначале рассмотрим RL -структуру. В каждой ЦН исходной структуры из [1] (показано на рис. 1,б сплошными линиями) незаземленным является резистор. Вводимые дополнительные резисторы R_{1i} (показаны штриховыми линиями) подключаются к двум входным выводам в каждой ЦН. В результате каждая ЦН тоже будет содержать три элемента: два резистора и индуктивную катушку. Каждая последующая ЦН подключается параллельно индуктивной катушке предыдущей ЦН.

В случае воздействия на двухполюсник (рис. 1,б) линейно изменяющегося напряжения ток в цепи после окончания переходного процесса не будет зависеть от R_{12} , R_{22} , L_2 и значений параметров всех последующих ЦН. При подаче импульса напряжения, изменяющегося во времени по закону второй степени, ток не будет зависеть от L_2 и значений параметров всех последующих ЦН. И т.д. В двухполюснике RL -структуры (рис. 1,б) ЦН тоже могут быть неполными. В первой из них допускается отсутствие резисторов R_{11} и R_{21} , а в последней j -й ЦН – резистора R_{2j} и индуктивной катушки L_j . Не допускается в ЦН отсутствие только индуктивной катушки L_i и в промежуточных ЦН – R_{2j} .

Далее обратимся к *CRLR*-структуре двухполюсника (рис. 1,б). В каждой ЦН исходной структуры из [1] (показан сплошными линиями) незаземленными являются конденсатор и один из двух резисторов. Вводимый дополнительный конденсатор C_{11} (показан штриховыми линиями) подключается к двум входным выводам в каждой ЦН. В каждой ЦН вводимый дополнительный резистор R_{11} (показано на рис. 1,б штриховыми линиями) включен между общей шиной двухполюсника и общим выводом конденсатора C_{21} и резистора R_{21} . Полные ЦН содержат шесть элементов: два конденсатора, три резистора и одну индуктивную катушку. Каждая последующая ЦН подключается параллельно относительно параллельно включенных индуктивной катушки и третьего резистора предыдущей ЦН.

Если на двухполюсник (рис. 1,б) воздействует линейно изменяющееся напряжение, то после окончания переходного процесса ток в цепи не будет зависеть от R_{11} , R_{21} , L_1 , R_{31} и значений параметров всех последующих ЦН. При подаче напряжения, изменяющегося во времени по закону второй степени, ток не будет зависеть от L_1 , R_{31} и значений параметров всех последующих ЦН. В случае подачи импульса напряжения, изменяющегося во времени по закону третьей степени, ток не зависит от R_{31} и значений параметров всех последующих ЦН. И, наконец, при воздействии напряжения, изменяющегося во времени по закону четвертой степени, ток не зависит от значений параметров всех следующих за первой ЦН. И т.д.

В рассматриваемом двухполюснике *CRLR*-структуры (рис. 1,б), так же как и в двухполюсниках двух предыдущих структур, ЦН могут быть неполными. В первой из них допускается отсутствие элементов в следующих трех сочетаниях: 1) C_{11} и C_{21} ; 2) C_{11} , C_{21} , R_{11} и R_{21} ; 3) C_{11} , C_{21} , R_{11} , R_{21} и L_1 . В последней j -й ЦН могут отсутствовать элементы тоже в трех сочетаниях: 1) R_{3j} ; 2) R_{2j} , L_j и R_{3j} ; 3) C_{2j} , R_{1j} , R_{2j} , L_j и R_{3j} . Не допускается в ЦП отсутствие только конденсатора C_{2j} , только индуктивной катушки L_j или совместное их отсутствие.

Во всех ЦН двухполюсников *CRLR*-структуры, в том числе и в промежуточных, допустимо совместное отсутствие резисторов R_{1j} и R_{2j} . Частный пример отсутствия этих элементов в первой ЦН приведен на рис. 1,г. При этом после окончания переходного процесса при воздействии на двухполюсник напряжения каждой из форм линейно изменяющейся, изменяющейся во времени по закону второй и закону третьей степени электрический ток в цепи описывается соответственно формулами:

$$\left. \begin{aligned} i(t \rightarrow \infty) &= \frac{U_1}{t_1} (C_{11} + C_{21}); \\ i(t \rightarrow \infty) &= \frac{2U_1}{t_1^2} (C_{11} + C_{21})t; \\ i(t \rightarrow \infty) &= \frac{6U_1}{t_1^3} \left[(C_{11} + C_{21}) \frac{t^2}{2} - L_1 C_{21}^2 \right]. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Из (9) следует, что при переходе от линейно изменяющегося питающего напряжения к напряжению, изменяющемуся по закону второй степени, число параметров, от которых не зависит ток, остается прежним (9), т.е. не уменьшается. От перехода далее на напряжение, изменяющееся во времени по закону третьей степени, число параметров, от которых не зависит ток, снова уменьшается (9).

Также в каждой ЦН рассматриваемой структуры двухполюсников могут отсутствовать только резистор R_{3j} и совместно R_{1j} , R_{2j} и R_{3j} . И в каждом из этих двух последних случаев тоже не уменьшается число параметров, от которых не зависит электрический ток при переходе на питающее напряжение с последующим показателем степени в его математическом описании.

Двухполюсники с различными вариантами отсутствия элементов в ЦН можно считать производными от двухполюсников трех основных структур (рис. 1,а–в). К производным также относятся двухполюсники, где имеются переходы от ЦН одного варианта структуры к другому. Существуют шесть вариантов основных таких переходов от ЦН каждой из трех структур к структурам двух других вариантов. При переходе в двухполюснике от ЦН *CR*-структуры, а также от *CRLR*-структуры к ЦН *RL*-структуры необходимо использовать два дополнительных конденсатора. Первый из них C_1 включается между двумя выводами входа первой ЦН *RL*-структуры (показан штриховыми линиями), а второй C_2 – между общим выводом двух резисторов этой первой ЦН и тем выводом ее входа, который не соединен с общей шиной двухполюсника (рис. 2,а и б).

Если в двухполюснике осуществляется переход от ЦН *RL*-структуры к ЦН *CR*- или *CRLR*-структур, то следует использовать дополнительный резистор R_1 (тоже выделен штриховыми линиями на рис. 2,в и г). Он включается между двумя входными выводами первой ЦН *CR*- или *CRLR*-структур. В случаях перехода в двухполюснике от ЦН *CR*-структуры к ЦН *CRLR*-структуры и от ЦН *CRLR*-структуры к ЦН *CR*-структуры дополнительные элементы включать не требуется (рис. 2,д, е).

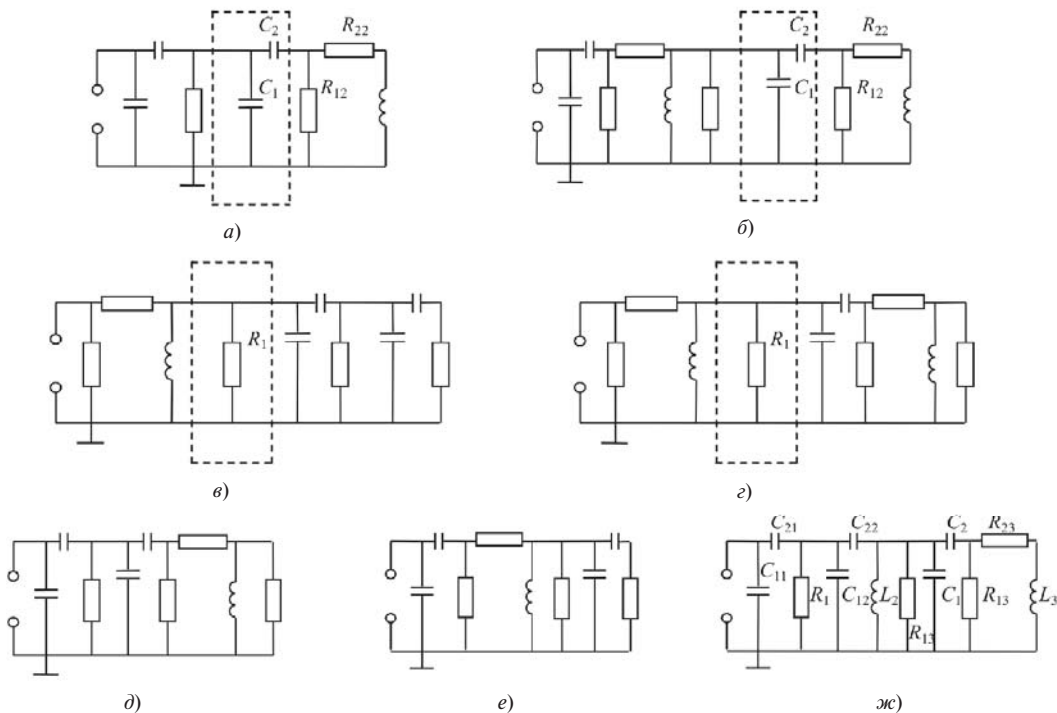


Рис. 2

В одном двухполюснике могут быть произвольные переходы от ЦН одних структур к ЦН других структур и произвольное число таких переходов. В качестве примера на рис. 2, ж приведен двухполюсник, у которого первая ЦН *CR*-структуры, вторая *CRLRL*-структуры, где отсутствуют резисторы R_{12} и R_{22} (это допустимо) и далее имеется переход (C_1, C_2) к ЦН *RL*-структуры.

Резистор R_1 , включенный в месте перехода от ЦН *RL*-структуры к ЦН *CR*- или *CRLRL*-структур (рис. 2, в и г), может отсутствовать. Тогда, так же как и при отсутствии резисторов в ЦН *CRLRL*-структуры (рис. 1, з), при увеличении на единицу показателя степени в математическом описании питающего напряжения не происходит уменьшение числа параметров, от значений которых после окончания переходного процесса электрический ток не зависит. В случае перехода от ЦН *CR*-структуры или *CRLRL*-структуры к ЦН *RL*-структуры (рис. 2, а и б) также допустимо отсутствие двух резисторов R_{12} и R_{22} .

Число двухполюсников с различными вариантами отсутствия элементов в ЦН, с различными переходами от ЦН одной структуры к ЦН другой структуры и с различным числом таких переходов в одном двухполюснике является труднообозримым. Если не ограничивать число элементов в цепи, то обсуждаемым свойством обладает, в принципе, неограниченное число частных реализаций электрических двухполюсников. Поэтому и с этих позиций является оправданным выявление не частных вариантов таких двухполюсников, а возможных вариантов их структур.

Если на рассмотренные электрические двухполюсники при значительном числе ЦН воздействуют электрические сигналы с изменением напряжения по закону степенных функций

$$u = U_1 \left(\frac{t}{t_1} \right)^h, \tag{10}$$

то электрический ток в обобщенном виде определяется выражением

$$i = \frac{U_1 h!}{t_1^h} \int_0^t \int_0^t \dots \left\{ \int_0^t \left[\frac{F(0)}{f(0)} + \sum_{i=1}^k \frac{F(p_i)}{p_i f'(p_i)} e^{p_i t} \right] dt \right\} \dots dt, \tag{11}$$

где h принимает значения 0, 1, 2, ...; k – число корней уравнения $f(p)=0$; $f(p)$ и $F(p)$ определяются параметрами электрической цепи и находятся из функции сопротивления двухполюсника.

Абсолютная ошибка, возникающая из-за того, что не учитываются значения ряда параметров цепи, определяется экспоненциальными слагаемыми и в обобщенном виде находится из выражения

$$\Delta i = \frac{U_1 h!}{t_1^h} \sum_{i=1}^k \frac{F(p_i)}{p_i^{h+1} f'(p_i)} e^{p_i t_2}. \tag{12}$$

Для обсуждения можно предложить следующую формулировку рассмотренного свойства двухполюсных электрических цепей определенных структур. При воздействии электрических сигналов, изменяющихся во времени по закону степенных функций, на двухполюсники, содержащие структуры с *CR*-, *RL*- и *CRLRL*-цепями наращивания и их производные, напряжение или ток в них после

окончания переходного процесса в выбранном интервале времени не зависят от значений параметров определенной совокупности элементов со сколь угодно малой заданной ошибкой. С возрастанием на единицу показателя степени воздействующего сигнала число параметров, от которых не зависит напряжение или ток, убывает в общем случае на один или два, причем единственный элемент в первом случае и один из элементов во втором случае имеют соединение с общей шиной цепи. Если есть варианты, в которых отсутствуют резисторы в ЦН *CRLR*-структуры или в месте перехода от ЦН одной структуры к ЦН другой, то при переходе к воздействию сигнала с последующим показателем степени такого убывания не происходит, а далее число параметров, от которых не зависят напряжение или ток в цепи, убывает в рассмотренном выше порядке.

Решение поставленной задачи получилось несложным. В исходные структуры двухполюсников из [1] добавляются по одному только те элементы, ни один вывод которых не соединен с общей шиной электрической цепи (не заземлен). В результате относительно исходных ЦН в двухэлементные ЦН вводится только один элемент (рис. 1, *а* и *б*), и они становятся трехэлементными, а в четырехэлементные ЦН вводятся два элемента (рис. 1, *в*), и они становятся шестиэлементными. Таким образом, видно, что в ЦН вводится минимальное число элементов.

Полезным применением рассмотренного свойства многоэлементных двухполюсников определенных структур является использование их в мостовых электрических цепях с импульсным питанием. Такие двухполюсники позволяют уравнивать мосты только заземленными регулирующими уравнивающими элементами. Для этого в мостовую цепь вместо двухполюсника с уравнивающими элементами, совпадающего с одной из структур в [1], следует ввести один из рассмотренных двухполюсников соответствующей структуры. Частный пример такой мостовой цепи приведен на рис. 3. В ней в двухполюснике с уравнивающими элементами от первой неполной ЦН *CRLR*-структуры имеется только один резистор R_1 , вторая ЦН той же структуры является также неполной, и в ней отсутствует последний резистор, включаемый параллельно индуктивной катушке (рис. 3).

В мостовой цепи элементы R , r , C_2 и R_3 имеют известные и постоянные значения параметров. Регулируемые уравнивающие элементы R_1 , C_1 , R_2 и L_1 имеют известные изменяющиеся значения параметров. И значения параметров объекта измерения r_1 , c_1 , r_2 и l_1 являются неизвестными (искомыми). Мост питается последовательностью импульсных сигналов с изменяющимся напряжением

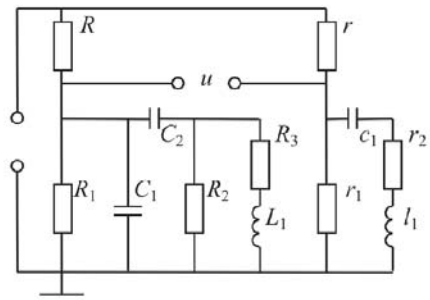


Рис. 3

в течение их длительности по закону степенных функций.

Вначале на мостовую цепь (рис. 3) подается последовательность импульсов напряжения прямоугольной формы. При воздействии очередного импульса в установившемся режиме импульс напряжения неравновесия (выходное напряжение моста) имеет плоскую вершину. Регулированием значения сопротивления заземленного уравнивающего резистора R_1 напряжение плоской вершины приводится к нулю и тем самым выполняется первое условие равновесия:

$$A_1 = rR_1 - r_1R = 0. \quad (13)$$

Далее на мост подается последовательность импульсов линейно изменяющегося напряжения. При воздействии очередного импульса после окончания переходного процесса импульс напряжения неравновесия имеет плоскую вершину. Напряжение приводится к нулю изменением значения емкости заземленного уравнивающего конденсатора C_1 . В результате выполняется второе условие равновесия мостовой цепи:

$$A_2 = c_1r - R(C_1 + C_2) = 0. \quad (14)$$

При этом первое условие равновесия не нарушается, так как регулируемый параметр в первое условие равновесия (13) не входит.

Если на мост поступает очередной импульс с изменением напряжения во времени по закону второй степени, то после окончания переходного процесса импульс выходного напряжения моста также имеет плоскую вершину. Напряжение приводится к нулю регулированием значения сопротивления заземленного уравнивающего резистора R_2 . Таким образом, выполняется третье условие равновесия:

$$A_3 = C_2R_2R_3(c_1r - C_1R) - c_1Rr_2 \times \\ \times (C_1 + C_2)(R_2 + R_3) = 0. \quad (15)$$

Выполнение первых двух условий равновесия (13) и (14) сохраняется, так как регулируемое сопротивление в них не входит.

Наконец, при воздействии очередного импульса с изменением напряжения во времени по закону третьей степени после окончания переходного процесса напряжение плоской вершины выходного сигнала моста приводится к нулю изменением значения индуктивности заземленной уравнивающей катушки индуктивности L_1 . Тогда выполняется четвертое условие равновесия мостовой цепи:

$$A_4 = L_1 C_2 R_2 (c_1 r - C_1 R) - c_1 R \{ (C_1 + C_2) \times \\ \times [L_1 r_2 + l_1 (R_2 + R_3)] + C_1 C_2 r_2 R_2 R_3 \} = 0. \quad (16)$$

Предыдущие три условия продолжают выполняться, поскольку регулируемый параметр L_1 в них не входит.

Из приведенного видно, что мостовая цепь рис. 3 уравнивается отдельно. Последовательность регулирования параметров уравнивающих элементов такова: R_1 , C_1 , R_2 и L_1 . Отсчет искомым параметров берется из условий равновесия (13)–(16). По существу четыре неизвестных определяются из четырех уравнений.

Многоэлементные двухполюсники в плечах сравнения мостовой цепи рис. 3 не являются эквивалентными, поэтому она не приводится к состоянию полного равновесия. После выполнения четырех этапов уравнивания напряжение плоской вершины выходного импульса моста равно нулю, в начале импульса и после его окончания имеются всплески, напряжение которых определяется суммой экспоненциальных слагаемых и в течение переходного процесса затухает до нуля. Возможности привести напряжение всплесков к нулю нет, так как регулирование значений любого из параметров мостовой цепи приводит к нарушению одного или нескольких условий равновесия (13)–(16), что недопустимо. Но обязательной необходимости в этом нет, потому что уже выполнены четыре условия равновесия (имеются в наличии четыре уравнения) и из них можно определить четыре неизвестных параметра, т.е. взять отсчет искомым параметров двухполюсника объекта измерения. Такие мосты относятся к квазиуравновешенным мостовым цепям [5].

Если в ЦН отсутствуют частично или полностью вводимые элементы, что показано на рис. 1, а–в штриховыми линиями, то мостовые цепи, в том числе на рис. 3, теряют возможность быть уравниваемыми только заземленными регулирующими элементами, но сохраняют отдельное уравнивание. В частности, если в мостовой цепи на рис. 3 отсутствует конденсатор C_1 , то ее следует уравнивать регулированием параметров R_1 , C_2 , R_2 и L_1 , при этом уравнивающий конденсатор C_2 не заземлен.

Рассмотренное свойство двухполюсников определенных структур, очевидно, можно использовать не только в традиционных мостовых цепях, приведенных на рис. 3 и в [2], но и в сравнительно новых мостах с частотно-независимыми двухполюсниками [3] и в мостах с расширенными функциональными возможностями [4].

Частные варианты двухполюсников трех структур и производных от них, а также мостовые цепи с их использованием моделировались на ЭВМ с помощью программы Multisim 9 и проверялись на реальных макетах. Испытания подтвердили наличие у двухполюсников рассмотренного свойства, а у мостовых цепей – возможность уравнивания только заземленными регулирующими элементами.

Таким образом, обосновано свойство многоэлементных двухполюсников трех структур, в принципе, с неограниченным числом элементов, а также обосновано получение производных двухполюсников от трех основных структур. Варианты производных двухполюсников определяются вариантами отсутствия отдельных элементов и их групп в ЦН и различными вариантами перехода от ЦН одних структур к ЦН других. Рассмотрено применение указанного свойства многоэлементных двухполюсников определенных структур в мостовых электрических цепях. Такие мосты сохранили положительные показатели мостовых цепей с импульсным питанием. Они отдельно уравниваются только заземленными регулирующими элементами. Многоэлементный двухполюсник объекта измерения тоже должен быть заземлен (рис. 3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Передельский Г.И.** О свойстве многоэлементных электрических цепей. – Электричество, 1989, №2.
2. **Передельский Г.И.** О теории построения мостовых цепей для измерения параметров четырехэлементных двухполюсников. – Измерительная техника, 1987, №2.
3. **Передельский Г.И.** О свойстве потенциально частотно-независимых двухполюсников. – Электричество, 2000, №11.
4. **Захаров И.С., Иванов В.И., Передельский Г.И.** Мостовые электрические цепи с расширенными функциональными возможностями. – Электричество, 2009, №9.
5. **Передельский Г.И.** Мостовые цепи с импульсным питанием. – М.: Энергоатомиздат, 1988.

[31.01.12]

Автор: 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 Курского государственного технического университета.