

Псевдодополнительные, псевдообратные и псевдоэквивалентные двухполюсные электрические цепи

ПЕРЕДЕЛЬСКИЙ Г.И.

Обосновано существование псевдоэквивалентных, псевдообратных и псевдодополнительных двухполюсных электрических цепей, а также приведен пример их полезного применения в мостовых электрических цепях.

Ключевые слова: двухполюсник, мостовая цепь, импульсное питание, условия равновесия

В теории электрических цепей в разделе двухполюсные электрические цепи выделяют дополнительные (дополняющие), обратные (инверсные) и эквивалентные двухполюсники [1–3]. Также используются понятия потенциально дополнительные, потенциально обратные и потенциально эквивалентные двухполюсники. Можно предположить, что могут существовать псевдодополнительные, псевдообратные и псевдоэквивалентные двухполюсные цепи. Такие цепи в общем случае, в принципе, не могут быть дополнительными, обратными или эквивалентными, но в частных случаях при некоторых формах питающих электрических сигналов и при выполнении некоторых положений (условий) они являются таковыми. Для них выполняется часть частных условий дополнительности, обратности или эквивалентности, а эти условия в общем случае в обобщенном виде не выполняются.

В статье приводятся результаты исследования псевдодополнительных, псевдообратных и псевдоэквивалентных двухполюсных электрических цепей и предложен вариант их полезного применения.

Псевдодополнительные двухполюсники. Вначале обратимся к дополнительным двухполюсникам, в частности к двухполюсникам из [4], приведенным на рис. 1 сплошными линиями. Потенциально дополнительные двухполюсники $R-R_1-C_1-R_2$ (левый) и $r_1-l_1-r_2-r$ (правый) образуют потенциально частотно-независимый двухполюсник при их параллельном соединении. Частные условия дополнительности для них известны [4]. Их число равно четырем, приведем далее их в следующем порядке. Выделим начальное условие дополнительности

$$A_0 = r - R = 0 \quad (1)$$

и далее приведем остальные с учетом выполнения начального условия:

The existence of pseudoequivalent, pseudoinverse, and pseudosupplementary two-pole electric circuits is substantiated, and an example of their useful application in bridge electric circuits is given.

Key words: two-pole network, bridge circuit, impulse power supply, equilibrium conditions

$$\begin{aligned} A_1 &= rR_1 - R^2 = 0; \\ A_2 &= l_1 - C_1R^2 = 0; \\ A_3 &= r_2R_2R^2 = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

В [4] обосновано, что условия дополнительности (2) также являются условиями равновесия четырехплечей мостовой цепи, где измерительная диагональ показана на рисунке штриховыми линиями. Это объясняется следующим. Если записать в операторной форме условие дополнительности и условие равновесия четырехплечей мостовой цепи с несмежными плечами сравнения (например мост Максвелла) и одиночными резисторами в плечах отношения, то при равенстве значений сопротивлений одиночных резисторов коэффициенты при операторах в одинаковых степенях становятся попарно равными. В эти коэффициенты входят соответственно частные условия дополнительности и частные условия равновесия моста. И из них получаем, что частные условия дополнительности и частные условия равновесия совпадают.

При выполнении частных условий дополнительности (1), (2) потенциально дополнительный

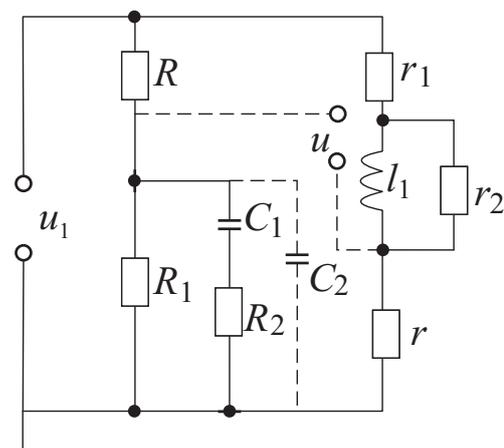


Рис. 1

двухполюсник на рис. 1 становится дополнительным и для него теперь выполняется обобщенное условие дополнительности

$$Y + y = 1/R, \quad (3)$$

где Y и y – соответственно проводимости левого и правого двухполюсников (рис. 1). Это обобщенное условие дополнительности справедливо в общем случае, т.е. для питающих электрических сигналов любой формы и частоты.

Рассмотрим случай импульсного питания электрической цепи. Пусть используются импульсы с изменением напряжения в течение их длительности по закону степенных функций:

$$u_1 = U_1 (t/t_{и})^h, \quad (4)$$

где U_1 – амплитуда импульсов; t – текущее время; $t_{и}$ – длительность импульсов; h принимает целочисленные значения 0, 1, 2, ...

Введем, например, в левый двухполюсник конденсатор C_2 . На рис. 1 это показано штриховыми линиями. Тогда левый и правый двухполюсники, в принципе, становятся не дополнительными. В частности, на частотах, стремящихся к бесконечности, проводимость левого двухполюсника стремится к $1/R$, а правого – к $1/(R + r_1 + r_2)$, и для них не выполняется обобщенное условие дополнительности (3). Но для них может выполняться часть частных условий дополнительности, и тогда их можно отнести к псевдодополнительным двухполюсникам.

Для обсуждаемых двух двухполюсников (рис. 1) частные условия дополнительности и одновременно условия равновесия (квазиравновесия) мостовой цепи с учетом выполнения условия (1) имеют вид:

$$\begin{aligned} A_1 = r_1 R_1 - R^2 = 0; \quad A_2 = l_1 - (C_1 + C_2) R^2 = 0; \quad (5) \\ A_3 = l_1 C_1 R_2 r_2 - (C_1 + C_2) l_1 R^2 - C_1 C_2 R^2 R_2 r_2 = 0. \end{aligned}$$

Для рассматриваемой электрической цепи справедливы следующие положения. При воздействии прямоугольного (4) питающего импульса ($h=0$) и выполнении первого условия дополнительности (5) в интервале времени от окончания переходного процесса и до окончания питающего импульса проводимость электрической цепи вещественная и равна $1/R$. Если воздействует импульс (4) линейно изменяющегося напряжения ($h=0$) и выполняются первые два условия дополнительности в (5), то в названном интервале времени проводимость тоже вещественная и тоже равна $1/R$. И в случае подачи импульса (4) с изменяющимся напряжением во времени по закону второй степени ($h=2$) и выполнении уже трех условий дополнительности (5) в

прежнем интервале времени проводимость также вещественная и равна $1/R$.

Для подтверждения приведенных положений в качестве частного примера примем, что питающие импульсы (4) – линейно изменяющееся напряжение и выполняются первые два частных условия дополнительности в (5). Для этого варианта в интервале времени от окончания переходного процесса и до окончания действия импульса с учетом выполнения начального условия (1) функция проводимости левого двухполюсника (рис. 1) определяется выражением

$$Y(t \text{ @ } \text{¥}) = \frac{1}{R + R_1} + \frac{R_1^2 (C_1 + C_2)}{t(R + R_1)^2}; \quad (6)$$

правого двухполюсника –

$$y(t \text{ @ } \text{¥}) = \frac{1}{R + r_1} - \frac{l_1}{t(R + r_1)^2}. \quad (7)$$

Используя первое и второе частных условия дополнительности (5) и тождественные преобразования, сопоставим вторые слагаемые в (6) и (7). В частности, выразим из условий дополнительности параметры левого двухполюсника R_1 и $(C_1 + C_2)$ через параметры правого двухполюсника и подставим их во второе слагаемое (6). В результате получим, что выделенные вторые слагаемые определяются равными по абсолютной величине выражениями с противоположными знаками. Учитывая это и применяя первое частное условие дополнительности для первых слагаемых в (6) и (7), получаем, что в интервале времени от окончания переходного процесса и до окончания питающего импульса выполняется обобщенное условие дополнительности (3). Тем самым рассмотренный частный вариант подтверждает наличие псевдодополнительных двухполюсников.

Порядковый номер частного условия дополнительности можно определить из анализа мостовой цепи (рис. 1) при импульсном питании. Если на мост воздействует импульс (4) прямоугольной формы, то после окончания переходного процесса числитель математического описания выходного напряжения моста представляет собой разность. Она является первым условием равновесия моста и в соответствии с [4] первым частным условием дополнительности. В случае подачи импульса (4) линейно изменяющегося напряжения после окончания переходного процесса числитель в общем случае содержит первое условие равновесия и разность, которая является вторым условием равновесия и вторым частным условием дополнительности. В частном случае первое условие равновесия

здесь может отсутствовать. При квадратичном импульсе числитель в общем случае состоит из первого условия равновесия, второго и разности, представляющей собой третье условие равновесия и третье частное условие дополнительности. И т.д. В частном случае здесь могут отсутствовать первое или второе условие равновесия или оба эти условия.

В [5] обоснована возможность использования дополнительных двухполюсников в четырехплечих мостовых электрических цепях с импульсным питанием. В их трех плечах содержатся одиночные резисторы, а в одном из плеч — дополнительные двухполюсники. Вместо них можно включить псевдодополнительные двухполюсники. Тогда мостовая цепь получает дополнительный положительный показатель, заключающийся в том, что она раздельно уравнивается только заземленными регулирующими уравнивающими элементами. При прочих равных условиях предпочтение отдается мостовым цепям с заземленными регулирующими уравнивающими элементами [6].

На рис. 2 приведена мостовая цепь с псевдодополнительными двухполюсниками. В ней выделены две клеммы для подключения двухполюсника объекта измерения, в данном случае это двухполюсник $r_1 - l_1 - r_2$. В соответствии с [5] для этого моста следует выполнить предварительное условие

$$A_0 = Rr_{01} - R_0r_{02} = 0. \quad (8)$$

В этом случае условия равновесия мостовой цепи (рис. 2), как показано в [5], совпадают с частными условиями дополнительности (5).

Мостовая цепь на рис. 2 тоже уравнивается в три этапа. На первом при воздействии прямоугольного импульса (4) напряжение плоской вер-

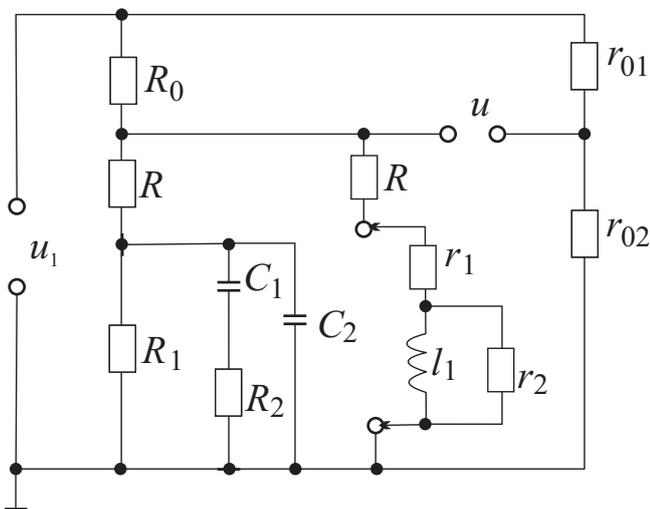


Рис. 2

шины выходного напряжения моста приводится к нулю регулированием значения сопротивления R_1 . В результате выполняется первое условие равновесия (5). Здесь и в дальнейшем информативным является напряжение плоской вершины выходных импульсов моста в интервале времени от окончания переходного процесса и до окончания питающего импульса. Один из выводов регулируемого резистора R_1 заземлен (рис. 2).

На втором этапе при подаче импульса линейно изменяющегося напряжения (4) напряжение плоской вершины выходного импульса моста следует приводить к нулю только регулированием емкости конденсатора C_2 , так как он заземлен. Тем самым выполняется второе условие равновесия (5). Первое условие равновесия не нарушается, так как C_2 в него не входит.

На третьем этапе в случае поступления питающего импульса с изменяющимся напряжением в течение его длительности по закону третьей степени ($h=3$) в зависимости от времени импульсное напряжение неравновесия приводится к нулю регулированием сопротивления R_2 (оно тоже является заземленным). В результате выполняется третье условие равновесия (5). В первые два условия равновесия сопротивление R_2 не входит, и его регулирование не приводит к их нарушению. В результате все уравнивания мостовой цепи выполняются раздельно.

Так как входящие в одно плечо мостовой цепи (рис. 2) многоэлементные двухполюсники являются псевдодополнительными, а не дополнительными, то мост к полному равновесию не приводится. После трех этапов уравнивания в выходном напряжении моста имеются всплески напряжения во время переходных процессов в начале питающего импульса и после его окончания. Эти всплески определяются суммой экспоненциальных слагаемых и затухают до нуля за время переходных процессов. Мостовая цепь приводится к состоянию, когда выполнены три условия равновесия. Путем тождественных преобразований их следует разрешить относительно трех определяемых (искомых) r_1 , l_1 и r_2 двухполюсника объекта измерения:

$$r_1 = R^2 / R_1; \quad l_1 = R^2 (C_1 + C_2);$$

$$r_2 = R^2 (C_1 + C_2)^2 / C_1^2 R^2.$$

Приведенные выражения являются формулами для расчета искомых параметров по известным значениям параметров R , R_1 , R_2 , C_1 и C_2 мостовой цепи. Такие мостовые цепи относятся к квазиуравновешенным мостам.

Псевдообратные двухполюсники. Двухполюсники на рис. 1 $R_1 - C_1 - R_2$ и $r_1 - l_1 - r_2$ (указаны сплошными линиями) являются обратными, и для них в общем случае справедливо обобщенное условие обратности

$$z_0 Z_0 = R^2, \quad (9)$$

где z_0 — сопротивление резистивно-индуктивного двухполюсника; Z_0 — сопротивление резистивно-емкостного двухполюсника. Приведенное условие, если выполняется (1), является также обобщенным условием равновесия мостовой цепи на рис. 1 (без учета конденсатора C_2). Этот же мост позволяет получить частные условия обратности, они совпадают с (2).

Введение в резистивно-емкостный двухполюсник (рис. 1) конденсатора C_2 (показано штриховыми линиями) приводит к тому, что рассматриваемые двухполюсники, в принципе, становятся необратными и для них в общем случае при любых значениях параметров не выполняется обобщенное условие обратности (9). Но для них может быть выполнена часть частных условий обратности, и в этом случае их можно отнести к псевдообратным электрическим двухполюсникам.

С учетом равенства (1) для обсуждаемых двухполюсников частные условия обратности и одновременно условия равновесия (квазиравновесия) мостовой цепи (рис. 1) совпадают с (5). Исследования выявили, что при воздействии прямоугольного питающего импульса (4) и выполнении первого условия обратности (5) в интервале времени от окончания переходного процесса и до окончания питающего импульса справедливо выражение (9). В случае подачи линейно изменяющегося питающего импульса (4) и выполнении первых двух условий обратности (5) в выделенном интервале времени также выполняется выражение (9). Если используется квадратичный питающий импульс (4) и выполняются три условия обратности (5), то в выделенном интервале времени также выполняется условие обратности (9).

Для частного подтверждения приведенных выше положений примем, что питающие импульсы (4) — тоже линейно изменяющееся напряжение и выполняются первые два условия обратности в (5). При воздействии очередного импульса в интервале времени от окончания переходного процесса и до окончания питающего импульса функции сопротивлений резистивно-емкостного и резистивно-индуктивного двухполюсников определяем из выражений:

$$\begin{aligned} Z_0(t \otimes \text{¥}) &= \frac{1}{Y(t \otimes \text{¥})} = R; \\ z_0(t \otimes \text{¥}) &= \frac{1}{y(t \otimes \text{¥})} = R. \end{aligned} \quad (10)$$

Обратимся к тождественным преобразованиям. В частности, выразим параметры резистивно-емкостного двухполюсника через параметры резистивно-индуктивного, используя два условия обратности (5), и определим произведение функций сопротивления двух двухполюсников в отмеченном интервале времени:

$$[z_0(t \otimes \text{¥})][Z_0(t \otimes \text{¥})] = \frac{R^2 A}{(R + r_1)^2} / \frac{A}{(R + r_1)^2} = R^2, \quad (11)$$

где

$$A = \frac{r_1}{R} + \frac{l_1(R - r_1)}{tR(R + r_1)} - \frac{l_1^2}{t^2(R + r_1)^2}. \quad (12)$$

Это подтверждает приведенное выше положение.

Псевдообратные двухполюсники тоже можно использовать в мостовых электрических цепях для их отдельного уравнивания только заземленными регулируемым уравнивающими элементами, что наглядно подтверждается мостовой цепью на рис. 1. Для этого на каждом этапе уравнивания следует регулировать заземленные регулируемые уравнивающие элементы в следующей последовательности: R_1 , C_2 и R_2 (5). Конденсатор C_1 имеет постоянное (не регулируемое) значение емкости. Объект измерения представляет собой двухполюсник $r_1 - l_1 - r_2$.

Псевдоэквивалентные двухполюсники. На рис. 3 двухполюсники $R_1 - C_1 - R_2$ и $r_1 - c_1 - r_2$ (указаны сплошными линиями) являются потенциально эквивалентными. Они включены в мостовую цепь. Согласно [7] при выполнении предварительного условия (1) условия равновесия мостовой цепи и

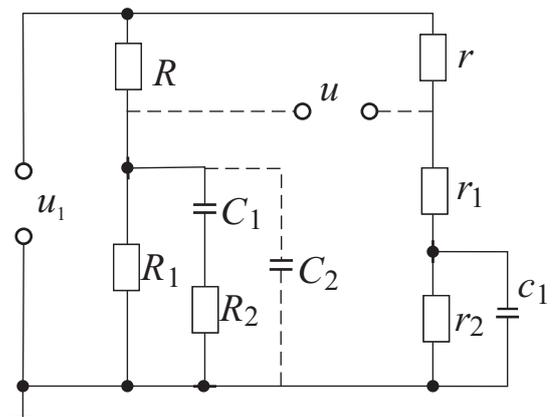


Рис. 3

частные условия эквивалентности двухполюсников совпадают и имеют вид:

$$\begin{aligned} A_1 &= R_1 - r_1 - r_2 = 0; \\ A_2 &= c_1 R_1 r_2 - C_1 R_1 (r_1 + r_2) - c_1 r_1 r_2 = 0; \\ A_3 &= R_1 R_2 - r_1 (R_1 + R_2) = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

При выполнении этих частных условий два двухполюсника на рис. 3 становятся эквивалентными и для них в общем случае выполняется обобщенное условие эквивалентности

$$Z_{\text{э}} = z_{\text{э}}, \quad (14)$$

где $Z_{\text{э}}$ и $z_{\text{э}}$ – соответственно сопротивления левого и правого двухполюсников (рис. 3).

Введем в схему левого двухполюсника конденсатор C_2 , что показано штриховыми линиями (рис. 3). Тогда становится очевидным, что левый и правый двухполюсники, в принципе, не являются эквивалентными и для них в общем случае не выполняется обобщенное условие эквивалентности (14). Однако для них может выполняться часть частных условий эквивалентности, и в этом случае их можно отнести к псевдоэквивалентным двухполюсникам.

Для рассматриваемых двух двухполюсников (рис. 3) частные условия эквивалентности и одновременно условия равновесия мостовой цепи при выполнении (1) определяются выражениями:

$$\begin{aligned} A_1 &= R_1 - r_1 - r_2 = 0; \\ A_2 &= c_1 R_1 r_2 - (C_1 + C_2)(r_1 + r_2)R_1 - c_1 r_1 r_2 = 0; \\ A_3 &= c_1 C_1 R_1 R_2 r_2 - C_1 C_2 R_1 R_2 (r_1 + r_2) c_1 r_1 r_2 - \\ & \quad [(C_1 + C_2)R_1 + C_1 R_2] = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

При воздействии прямоугольного питающего импульса и выполнении первого условия эквивалентности (15) в интервале времени от окончания переходного процесса и до окончания питающего импульса сопротивления двух двухполюсников равны. Если подается импульс линейно изменяющегося напряжения, то в отмеченном интервале времени функции сопротивления двухполюсников равны при выполнении первого и второго условий эквивалентности (15). В случае использования импульса с изменяющимся напряжением во времени по закону второй степени в выделенном интервале времени функции сопротивления двухполюсников равны, если выполняются первые три условия эквивалентности.

Для подтверждения приведенных положений примем, что питающие импульсы – линейно изменяющееся напряжение и выполняются первые два условия эквивалентности в (15). В выделенном интервале времени функции проводимости и соответ-

ственно сопротивлений двух двухполюсников получаются равными:

$$\frac{1}{R+R_1} + \frac{R_1^2(C_1+C_2)}{t(R_1+R_2)^2} = \frac{1}{R+r_1+r_2} + \frac{c_1 r_1^2}{t(R+r_1+r_2)^2}, \quad (16)$$

если, например, из первых двух условий эквивалентности (15) выразить параметры левого двухполюсника через параметры правого.

Псевдоэквивалентные двухполюсники также полезно использовать в мостовых электрических цепях для достижения их отдельного уравнивания только заземленными регулируемые уравнивающими элементами. В частности, для мостовой цепи на рис. 3 последовательность регулирования заземленных уравнивающих элементов такова: R_1 , C_2 и R_2 . Значение емкости конденсатора C_1 является постоянным. Значения искомого параметров r_1 , c_1 и r_2 двухполюсника объекта измерения определяются из условий равновесия (15) мостовой цепи (по сути из трех уравнений). Мост является квазиуравновешенным.

Общее определение псевдодополнительных, псевдообратных и псевдоэквивалентных двухполюсников. К псевдодополнительным, псевдообратным и псевдоэквивалентным двухполюсным электрическим цепям относятся двухполюсники, которые не являются дополнительными, обратными или эквивалентными и для них не выполняются в общем случае обобщенные условия дополнительности (3), обратности (9) или эквивалентности (14). Вместе с тем для таких двухполюсников могут выполняться два или более частных условия дополнительности, обратности или эквивалентности. Только при определенных условиях функции сопротивлений или проводимостей этих двухполюсников соответствуют обобщенным условиям дополнительности, обратности или эквивалентности. Определенные условия заключаются в том, что питание цепи осуществляется импульсами с изменением напряжения в течение их длительности по закону степенных функций (4). Функции сопротивлений или проводимостей двухполюсников должны находиться в интервале времени от окончания переходного процесса и до окончания питающего импульса.

При импульсе линейно изменяющегося напряжения должны выполняться первые два частных условия дополнительности, обратности или эквивалентности и далее с каждым возрастанием на единицу показателя степени в математическом описании питающих импульсов (4) также на единицу должно увеличиваться число выполняющихся частных условий дополнительности, обратности и эквивалентности.

Приведенные положения справедливы и для других вариантов псевдоэквивалентных, обратных и дополнительных двухполюсников. В качестве примера на рис. 4 приведен вариант псевдоэквивалентных двухполюсников $C_1-R_1-L_1-R_2-C_2$ и $c_1-r_1-l_1$. В каждом двухполюснике содержатся различные реактивные элементы, и двухполюсники включены в мостовую цепь. Выражения

$$\begin{aligned} A_1 &= c_1 - C_1 - C_2 = 0; \\ A_2 &= R_2(C_1^2 R_1 - c_1^2 r_1) - c_1^2 r_1 R_1 = 0; \\ A_3 &= L_1 C_1^2 R_1^2 - C_1(R_1 + R_2)[c_1 C_2 r_1 R_1 R_2 + \\ &+ l_1 C_1(R_1 + R_2)] = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

являются частными условиями эквивалентности и условиями равновесия мостовой цепи. Последующие выражения в (17) приведены с учетом выполнения предыдущих.

На трех этапах уравнивания последовательность регулирования уравнивающих элементов такова: C_2 , R_2 и L_1 . Все они заземлены. Мост (рис. 4) уравнивается отдельно и относится к квазиуравновешенным. Рассматриваемые и предыдущие мостовые цепи реально имеют более трех условий равновесия, но они не приведены, так как их, в принципе, нет возможности привести к нулю. Они могут представлять собой произведение параметров, которые имеют конечные значения, представлять собой арифметическую сумму ненулевых слагаемых и, наконец, представлять собой разность, но при попытке привести ее к нулю регулированием любого из параметров вызывает нарушение одного или нескольких предыдущих условий равновесия, что недопустимо. В частности, для мостовой цепи на рис. 4 последующие условия равновесия имеют вид:

$$\begin{aligned} A_4 &= -c_1 \{L_1 C_1 C_2 r_1 R_2 + [L_1(C_1 + C_2) + C_1 C_2 R_1 R_2]\}; \\ A_5 &= l_1 L_1 C_1 c_1 C_2 R_2, \end{aligned} \quad (18)$$

и они не могут быть приведены к нулю.

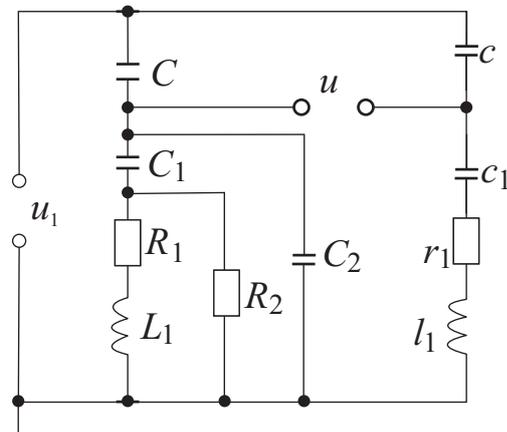


Рис. 4

Мостовые цепи с использованием псевдоэквивалентных, псевдообратных и псевдодополнительных двухполюсных электрических цепей исследовались на ЭВМ с помощью программы MultiSim 9 и на реальном макете. Испытания подтвердили, что у мостов имеется раздельное уравнивание только заземленными регулирующими уравнивающими элементами, а также подтвердили существование псевдоэквивалентных, псевдообратных и псевдодополнительных двухполюсников.

Регулируемый уравнивающий элемент в общем случае имеет большие габариты относительно нерегулируемого элемента, и он, если не заземлен, имеет соответственно большую паразитную емкость относительно земли, что приводит к увеличению соответствующей составляющей погрешности измерения. Паразитная емкость не стабильна и изменяется с течением времени из-за старения, а также изменения температуры. Это приводит к дополнительной составляющей погрешности.

При работе мостовых приборов в производственных условиях, в условиях помех уравнивающие элементы экранируют. Экраны заземленных регулируемых элементов соединяют с землей, а для экранов незаземленных элементов приходится искать, с каким выводом моста достигается лучший вариант соединения [6]. (В последнем случае соединение экрана с землей — не лучший вариант.)

Предпочтение в уравнивании заземленными регулирующими элементами отдается и в том случае, когда для этого используются матрица однотипных элементов, управляемые ключи и схема управления. Изменение значения параметра осуществляется здесь при замыкании и размыкании соответствующих ключей под действием сигналов с заземленной электронной схемы управления. И если уравнивающий элемент заземлен, то не требуется использовать дополнительные развязывающие элементы (трансформаторы, оптронные пары).

Выводы. 1. Обосновано существование псевдодополнительных, псевдообратных и псевдоэквивалентных двухполюсных электрических цепей. Сформулировано их общее определение и рассмотрено их полезное применение в мостовых электрических цепях.

2. Мосты на основе псевдодополнительных, псевдообратных и псевдоэквивалентных двухполюсников сохраняют положительные свойства мостовых цепей с импульсным питанием: обеспечивают раздельное уравнивание только заземленными регулирующими уравнивающими элементами, в ряде цепей допускается также заземление двухполюсников объектов измерения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Негушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. — М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Гиллемин Э.А. Синтез пассивных цепей. — М.: Связь, 1970.
3. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники, т. 1. — М.; Л.: Энергия, 1966.
4. Передельский Г.И., Диденко Ю.В., Афонин Е.Л. Частотно-независимые двухполюсники на основе четырехплечих мостовых цепей. — Электричество, 1998, № 1.
5. Передельский Г.И. О свойстве потенциально частотно-независимых двухполюсников. — Электричество, 2000, № 11.
6. Карандеев К.Б. Специальные методы электрических измерений. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963.
7. Передельский Г.И., Сатаров В.В. Определение эквивалентности двухполюсников на основе мостовых цепей с импульсным питанием. — Электричество, 1996, № 9.

[07.09.10]

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 Юго-Западного государственного университета (Курск).