
ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.317.733:621.314.33

Г. И. ПЕРЕДЕЛЬСКИЙ

МОСТОВЫЕ ЦЕПИ С ИМПУЛЬСНЫМ ПИТАНИЕМ И УРАВНОВЕШИВАНИЕМ ЗАЗЕМЛЕННЫМИ РЕГУЛИРУЕМЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Представлено решение задачи определения параметров сложных двухполюсников с использованием мостовых цепей с импульсным питанием и отдельным уравниванием заземленными регулируемые элементы. Сформулированы условия равновесия измерительных цепей и предложены аналитические соотношения для расчета параметров двухполюсников с использованием экспериментально полученных результатов.

Ключевые слова: мостовая цепь, импульсное питание, условие равновесия, регулируемый элемент.

Во входных узлах устройств сбора и первичной обработки информации используются измерительные цепи, к которым подключаются различные датчики. Одной из разновидностей измерительных цепей являются мостовые электрические цепи. Первые публикации о результатах исследования мостовых цепей с импульсным питанием [1, 2] относятся к середине прошлого века. Разработаны такие мостовые цепи для определения параметров двухэлементных [3], трехэлементных [4] и четырехэлементных [5] двухполюсников. Среди вариантов решения задачи определения параметров многоэлементных двухполюсников [6] были названы именно устройства на основе мостовых цепей с импульсным питанием.

Многоэлементный двухполюсник может состоять из эквивалентной схемы датчика, датчика вместе с линией связи, включенных совместно нескольких параметрических датчиков, например, подключенных к одной мостовой цепи двух резистивных и двух емкостных датчиков.

В устройствах сбора и первичной обработки информации нагрузкой генератора питающих импульсов является мостовая цепь с включенным в нее датчиком (или датчиками). С увеличением скважности импульсов уменьшаются средняя мощность, потребляемая мостовой цепью, и средние мощности на элементах мостовой цепи, в том числе и на датчике. Это вызывает уменьшение температурной составляющей погрешности измерения. В частности, посредством выбора соответствующей (большой) скважности импульсов можно уменьшить и размеры датчика, и температурную составляющую погрешности, при этом уменьшаются вносимые тепловые и электрические искажения.

Импульсный характер выходного сигнала мостовой цепи позволяет применять известные в импульсной технике методы выделения информативных сигналов из помех. Так, для подавления низкочастотной помехи питание мостовой цепи осуществляется парными двухполярными импульсами напряжения и применяется схема вычитания [7], в которой напряже-

ния помехи вычитаются, а напряжения информативного сигнала суммируются. В случаях когда данные методы являются важными или даже определяющими, целесообразно использовать мостовые цепи с импульсным питанием: например, в помещениях для прочностных и теплопрочностных испытаний крупногабаритных и дорогостоящих изделий, где весьма высок уровень помех [7, 8].

В работе [9] обоснована возможность в паузе между импульсами отключать электронные блоки, особенно электроемкие, от источников постоянного напряжения устройств на основе мостовых цепей с импульсным питанием. Это позволяет экономить электроэнергию, что улучшает энергетические показатели устройств. Время хранения радиоэлектронных элементов заметно превышает гарантированный срок их эксплуатации, поэтому такие показатели названных устройств, как срок службы и надежность повышаются. Реальное время работы отключаемых электронных блоков существенно меньше времени работы аппаратуры во включенном состоянии. Это реальное время уменьшается приблизительно в двадцать раз при скажности питающих мостовую схему импульсов, равной двадцати. Малое потребление энергии, увеличение срока службы и повышение надежности являются важными показателями для различной аппаратуры.

В четырехплечих мостовых электрических цепях с импульсным питанием для отдельного уравнивания необходимо обеспечить выполнение двух положений:

- 1) питание мостовых цепей следует осуществлять импульсами с изменением напряжения во время импульса по закону степенных функций;
- 2) двухполюсник с элементами уравнивания должен совпадать по количеству элементов, их свойствам и способу включения с двухполюсниками одной из структур, приведенных в работе [10].

Результаты анализа более двухсот мостовых цепей с отдельным уравниванием, приведенные в работе [5], позволяют определять параметры всех вариантов реальных (имеющих потери) двухэлементных, трехэлементных и четырехэлементных двухполюсников [6]. Количество их настолько большое, что исключена необходимость в мостовых цепях, в которых свойство отдельного уравнивания отсутствует.

На рис. 1—3 приведены схемы четырехплечих мостовых цепей I, II, III, где сплошными линиями показаны цепи, для которых выполняются оба вышеприведенных условия. В известной мостовой цепи I (см. рис. 1) [11] элементы уравнивания включены в резистивно-емкостный двухполюсник $C1—R1—C2—R2$; в мостовой цепи II (см. рис. 2) [12] — в резистивно-индуктивный двухполюсник $R1—L1—R2—L2$, и, наконец, в мостовой цепи III (см. рис. 3) [5] — в двухполюсник с разнородными реактивными элементами $C1—R1—L1—R2$.

Мостовые цепи уравниваются образцовыми регулируемыми элементами: резисторами переменного сопротивления, конденсаторами переменной емкости и катушками переменной индуктивности. Размеры таких элементов существенно больше, чем размеры элементов с нерегулируемыми параметрами. Поэтому паразитные емкости относительно „земли“ незаземленных образцовых регулируемых элементов тоже значительно больше. Паразитные емкости предопределяют соответствующую составляющую погрешности измерения. Эта составляющая возникает из-за нестабильности паразитных емкостей, так как они существенно изменяются с течением времени вследствие изменения влажности, старения, расположения окружающих предметов в пространстве и, особенно, изменения температуры. На незаземленные регулируемые уравнивающие элементы в более сильной степени влияют электромагнитные помехи и наводки. Для ослабления этого влияния уравнивающие элементы помещают в электрические и магнитные экраны [13]. При этом возникает вопрос, с какой вершиной мостовой цепи лучше соединять экраны. Каждый из имеющихся вариантов соединения не является безупречным. Для заземленных уравнивающих элементов очевидно, что экраны следует соединять с „землей“.

Регулируемый уравнивающий элемент, например резистор, может быть выполнен в виде матрицы резисторов, коммутируемых электронными ключами. В этом случае приходится использовать дополнительные „развязывающие“ элементы (трансформаторы, оптронные пары) и согласующие схемы. В мостовых устройствах, при прочих равных условиях, предпочтение отдается мостовым цепям с наибольшим числом заземленных регулируемых элементов уравнивания, и лучшим является вариант, когда заземлен один из двух выводов.

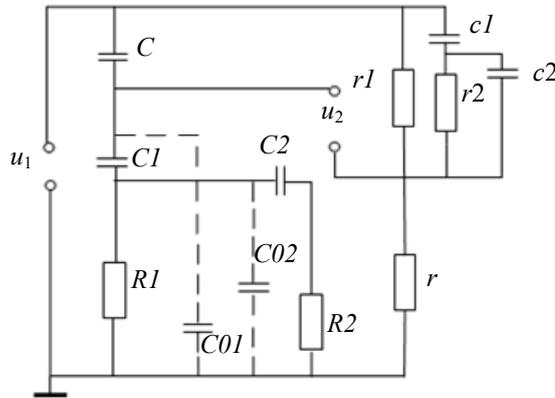


Рис. 1

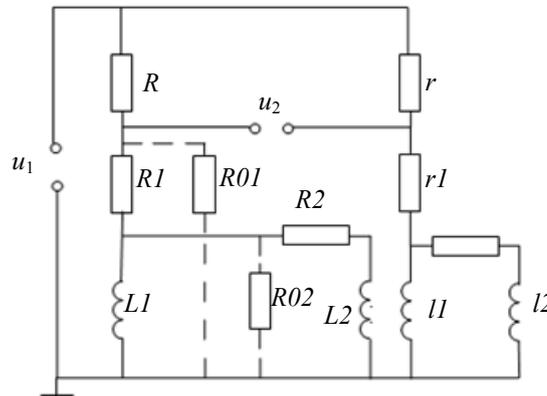


Рис. 2

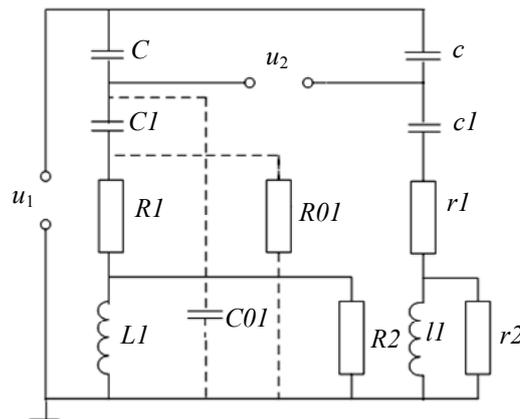


Рис. 3

В настоящей статье поставлена задача обосновать целесообразность использования мостовых цепей, уравнивающихся только заземленными регулируемыми элементами.

Рассмотрим сначала мостовую цепь I (см. рис. 1). В данном случае целесообразно в двухполюсник с уравнивающими элементами мостовой цепи вводить такой же элемент, как и незаземленный, и один из его выводов соединять с общей шиной (заземлять). Так как в мостовой цепи I таких элементов два — $C1$ и $C2$, то следует вводить два дополнительных конденсатора $C01$ и $C02$ (показаны пунктирными линиями), и один из двух выводов каждого

из них заземлять. Для конденсатора $C01$ вывод можно соединять с измерительной диагональю первой ветви мостовой цепи, а для конденсатора $C02$ — с общим выводом резистора $R1$ и конденсатора $C2$. Вторым вариантом соединения — включение конденсатора $C01$ параллельно резистору $R1$, а конденсатора $C02$ — параллельно резистору $R2$. Первый вариант соединения оказался перспективным.

Конденсаторы $C01$ и $C02$ заземлены и их следует выбирать в качестве регулируемых уравнивающих элементов. В этом случае конденсаторы $C1$ и $C2$ имеют постоянное (нерегулируемое) значение емкости и меньшие по сравнению с конденсаторами $C01$ и $C02$ размеры.

При обобщенном анализе [14] выражение для выходного напряжения мостовой цепи содержит условия ее равновесия и обобщенные коэффициенты. Последние не имеют принципиального значения, выражаются громоздкими формулами и здесь не приводятся. Рассмотрим условия равновесия мостовой цепи.

На первом этапе уравнивания на мостовую цепь I подается последовательность импульсных сигналов прямоугольной формы. От момента окончания переходного процесса и до момента окончания импульса в выходном импульсе мостовой цепи имеется плоская вершина. Напряжение этой плоской вершины приводится к нулю однократной регулировкой заземленного уравнивающего конденсатора $C01$ и тем самым выполняется первое условие равновесия мостовой цепи:

$$A_1 = Cr_1 - r(C_1 + C_{01}) = 0. \quad (1)$$

Затем на втором этапе на мостовую цепь подается последовательность импульсов линейно изменяющегося напряжения. В этом случае каждый импульс напряжения неравновесия (выходное напряжение) мостовой цепи также имеет плоскую вершину. Напряжение такой вершины приводится к нулю однократной регулировкой заземленного резистора $R1$, что обеспечивает выполнение второго условия равновесия:

$$A_2 = C_1 R_1 (Cr_1 - C_{01} r) - c_1 r r_1 (C_1 + C_{01}) = 0. \quad (2)$$

В результате этого действия первое условие равновесия не нарушается, так как регулируемый параметр $R1$ не входит в выражение (1). Это избавляет от неоднократной регулировки двух параметров.

Далее на третьем этапе на мостовую цепь поступают квадратичные импульсы напряжения. По окончании переходного процесса каждый импульс напряжения неравновесия имеет плоскую вершину, напряжение которой приводится к нулю однократной регулировкой заземленного конденсатора $C02$, что обеспечивает выполнение третьего условия равновесия мостовой цепи:

$$A_3 = CC_1 r_1 r_2 - r[(C_1 + C_{01})(C_2 + C_{02})r_1 + C_1 C_{01}(r_1 + r_2)] = 0. \quad (3)$$

При этом условия (1) и (2) по-прежнему выполняются, так как регулируемый параметр $C02$ в них не содержится; это избавляет от многократной регулировки в данном случае трех, а в общем случае нескольких уравнивающих параметров.

Наконец, на четвертом этапе на мостовую цепь подаются кубические импульсы. По окончании переходного процесса импульсы напряжения неравновесия имеют плоские вершины, напряжение которых приводится к нулю посредством однократной регулировки заземленного резистора $R2$. В результате выполняется четвертое условие равновесия:

$$A_4 = C_1 C_2 R_2 r_2 (Cr_1 - C_{01} r) - C_2 r r_1 R_2 (C_1 C_{01} + C_1 C_{02} + C_{01} C_{02}) - c_2 r r_1 r_2 [C_1 C_{01} + (C_1 + C_{01})(C_2 + C_{02})] = 0. \quad (4)$$

Как и ранее, предыдущие три условия равновесия не нарушаются, так как регулируемое сопротивление $R2$ в них не входит.

Мостовая цепь I к полному равновесию не приводится. После четырех этапов уравнивая каждый импульс напряжения неравновесия содержит всплески в начале импульса и после его окончания. Всплески напряжения, определяемые суммой экспоненциальных слагаемых, в течение переходного процесса затухают до нуля. Такие мостовые цепи относят к квазиуравновешенным.

Для мостовой цепи I отсчет искомых параметров r_1, c_1, r_2, c_2 производится исходя из четырех условий равновесия (1)—(4):

$$r_1 = r \frac{C_1 + C_{01}}{C}, \quad (5)$$

$$c_1 = C_1 R_1 \frac{C r_1 - C_{01} r}{r r_1 (C_1 + C_{01})}, \quad (6)$$

$$r_2 = r r_1 \frac{C C_{01} + (C_1 + C_{01})(C_2 + C_{02})}{C_1 (C r_1 - C_{01} r)}, \quad (7)$$

$$c_2 = C_2 R_2 \frac{C_1 r_2 (C r_1 - C_{01} r) - r r_1 (C_1 C_{01} + C_1 C_{02} + C_{01} C_{02})}{r r_1 r_2 [C_1 C_{01} + (C_1 + C_{01})(C_2 + C_{02})]}. \quad (8)$$

В правой части выражения (5) значения всех параметров известны. Полученное из него значение сопротивления r_1 используется в последующих формулах (6) — (8) для определения значений параметров двухполюсника. Аналогично значение емкости c_1 , полученное из формулы (6), и значение сопротивления r_2 , полученное из (7), используются в последующих выражениях.

Для уравнивания четырехплечей мостовой цепи I (см. рис. 1) только заземленными регулируемыми элементами в резистивно-емкостный двухполюсник вводятся дополнительные элементы. Аналогичным образом дополнительные элементы можно вводить в резистивно-индуктивный двухполюсник с уравнивающими элементами. В частности, в известной [12] мостовой цепи (показана сплошными линиями на рис. 2) в резистивно-индуктивный двухполюсник следует вводить уравнивающие резисторы $R01$ и $R02$ (показаны пунктирными линиями), так как в нем имеются незаземленные резисторы $R1$ и $R2$. Один из выводов каждого из резисторов $R01, R02$ заземлен, другой вывод можно подключить к имеющимся элементам только двумя способами.

Мостовая цепь II (см. рис 2), как и предыдущая I, уравнивается в четыре этапа. На каждом из этапов на мостовую цепь подается последовательность импульсов одной из форм: прямоугольной, линейно изменяющейся, квадратичной или кубической; однократной регулировкой соответствующего заземленного элемента приводится к нулю напряжение плоской вершины выходных импульсов мостовой цепи. Последовательность регулирования уравнивающих элементов — $R01, L1, R02, L2$.

Отсчет определяемых параметров r_1, l_1, r_2, l_2 производится по формулам

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= \frac{r R_1 R_{01}}{R(R_1 + R_{01})}, \\ l_1 &= L_1 \frac{r R_{01} - R r_1}{R(R_1 + R_{01})}, \\ r_2 &= R_2 R_{02} \frac{r R_{01} - R r_1}{R[(R_1 + R_{01})(R_2 + R_{02}) + R_2 R_{02}]}, \\ l_2 &= L_2 \frac{R_{02}(r R_{01} - R r_1) - R r_2 (R_1 + R_{01} + R_{02})}{R[(R_1 + R_{01})(R_2 + R_{02}) + R_2 R_{02}]}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

В четырехплечих мостовых цепях (см. рис. 1, 2) в двухполюсниках с уравнивающими элементами имеются только однородные реактивные элементы (конденсаторы или катушки индуктивности). Схема создания мостовых цепей с уравниванием только заземленными регулируемыми элементами сохраняется и при разнородных реактивных элементах в двухполюснике с уравнивающими элементами. Так, в двухполюснике $C1, R1, L1, R2$ с элементами уравнивания мостовой цепи III (показано сплошными линиями на рис. 3) содержатся разнородные реактивные элементы [5]. Ни один из выводов конденсатора $C1$ и резистора $R1$ не заземлен. Поэтому в двухполюсник также следует вводить дополнительные конденсатор $C01$ и резистор $R01$, один из выводов которых соединяется с „землей“. Другой вывод конденсатора $C01$ можно подключить к общим выводам либо конденсаторов C и $C1$, либо конденсатора $C1$ и резистора $R1$, либо резистора $R1$ и катушки индуктивности $L1$. К положительному результату приводит первый вариант соединения (показан пунктирными линиями). Незаземленный вывод резистора $R01$ можно соединять с общими выводами конденсатора $C1$ и резистора $R1$, а также конденсаторов C и $C1$. Здесь к положительному результату приводит тоже первый вариант (показан пунктирными линиями). Тогда конденсатор $C1$ и резистор $R1$ следует выбирать с постоянными значениями параметров, а мостовую цепь уравнивать только заземленными регулируемыми элементами $C01, R01, L1, R2$.

При рассмотрении мостовой цепи III (см. рис. 3) используется аналогичный схемам I и II подход. В данном случае последовательность регулирования уравнивающих элементов — $C01, R01, L1, R2$. Отсчет искомых параметров c_1, r_1, l_1, r_2 производится по формулам

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= c \frac{C_1 + C_{01}}{C}, \\ r_1 &= C_1 R_1 R_{01} \frac{C c_1 - c C_{01}}{c c_1 (C_1 + C_{01})(R_1 + R_{01})}, \\ l_1 &= \frac{L_1 C_1 R_{01} (C c_1 - c C_{01}) - c c_1 r_1 (L_1 C_1 + L_1 C_{01} + C_1 C_{01} R_1 R_{01})}{c c_1 (C_1 + C_{01})(R_1 + R_{01})}, \\ r_2 &= l_1 R_2 \frac{L_1 C_1 R_{01} (C c_1 - c C_{01}) - c c_1 r_1 (L_1 C_1 + L_1 C_{01} + C_1 C_{01} R_1 R_{01})}{c c_1 [L_1 C_1 C_{01} r_1 R_{01} (R_1 + R_2) + l_1 R_2 (L_1 C_1 + L_1 C_{01} + C_1 C_{01} R_1 R_{01}) + l_1 L_1 (C_1 + C_{01})(R_1 + R_{01})]}. \end{aligned} \right\} (10)$$

При необходимости в мостовые цепи можно вводить не два дополнительных заземленных элемента уравнивания, а только один, причем любой. Например, в мостовую цепь III можно ввести дополнительный регулируемый конденсатор $C01$, а дополнительный резистор $R01$ не вводить. Тогда последовательность регулирования элементов на различных этапах уравнивания мостовой цепи — $C01, R1, L1, R2$, и один из четырех регулируемых элементов, а именно резистор $R1$, является незаземленным. При этом первая формула в системе уравнений (10) сохраняется, а остальные три формулы принимают следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= C_1 R_1 \frac{C c_1 - c C_{01}}{c c_1 (C_1 + C_{01})}, \\ l_1 &= c_1 \frac{L_1 (C c_1 - c C_{01}) - c c_1 C_{01} R_1 r_1}{c c_1 (C_1 + C_{01})}, \\ r_2 &= l_1 C_1 R_2 \frac{L_1 (C c_1 - c C_{01}) - c c_1 C_{01} R_1 r_1}{c c_1 [L_1 C_1 C_{01} r_1 (R_1 + R_2) + l_1 C_1 C_{01} R_1 R_2 + l_1 L_1 (C_1 + C_{01})]}. \end{aligned} \right\} (11)$$

Четырехплечие мостовые цепи на основе левых ветвей (см. рис. 1, 2) предназначены для определения параметров двухполюсников с однородными реактивными элементами, всех двухэлементных и всех трехэлементных двухполюсников. Среди четырехэлементных имеются такие двухполюсники, параметры которых однозначно не определяются. В работе [6] они

названы неразрешимыми двухполюсниками. Мостовые цепи I и II позволяют определять параметры всех разрешимых четырехэлементных двухполюсников с однородными реактивными элементами, а мостовая цепь III — параметры восьми вариантов четырехэлементных двухполюсников с двумя разнородными реактивными элементами [5].

Рассмотренные мостовые цепи прошли экспериментальную проверку на моделях с помощью программы Workbench 9.0 и на реальных лабораторных макетах. Результаты испытаний подтвердили приведенные в статье положения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Эйтц Дж. Г., Лукас Д. Х., Джонсон Д. Д.* Метод многоканального измерения физических величин при помощи импульсных методов применительно к исследованию напряжений // Прикладная механика и машиностроение. 1952. № 4. С. 3—25.
2. *Юдин Е. Е.* Анализ импульсных мостовых схем // Автоматика и телемеханика. 1962. № 3. С. 407—412.
3. *Каменев Л. В.* Мостовые импульсные схемы для измерения электропроводности и диэлектрической проницаемости // Автоматизация химических производств. 1962. Вып. 1. С. 39—41.
4. А.с. 467273, СССР. Автоматический мост переменного тока / *А. А. Чеснис* // Б.И. 1975. № 14.
5. *Передельский Г. И.* Мостовые цепи с импульсным питанием. М.: Энергоатомиздат, 1988. 192 с.
6. *Кнеллер В. Ю., Боровских Л. П.* Определение параметров многоэлементных двухполюсников. М.: Энергоатомиздат, 1986. 144 с.
7. *Цапенко М. П., Диковский Я. М., Картюк Б. В.* и др. Тензометрическая система для прочностных испытаний // Приборы и системы управления. 1976. № 1. С. 31—33.
8. *Серьезнов А. Н.* Измерения при испытаниях авиационных конструкций на прочность. М.: Машиностроение, 1976. 238 с.
9. А.с. 1567985, СССР. Мостовое измерительное устройство / *Г. И. Передельский* // Б.И. 1990. № 20.
10. *Передельский Г. И.* О свойстве многоэлементных электрических цепей // Электричество. 1989. № 2. С. 73—75.
11. *Передельский Г. И., Нечаев И. А., Нечаева Н. Н.* Упрощение анализа измерительных цепей с многоэлементными двухполюсниками // Измерительная техника. 1995. № 10. С. 48—50.
12. А.с. 1150555, СССР. Мостовой измеритель параметров пассивных двухполюсников / *Г. И. Передельский, А. У. Касьянов* // Б.И. 1985. № 14.
13. *Карандеев К. Б.* Специальные методы электрических измерений. М. — Л.: Госэнергоиздат, 1963. 344 с.
14. *Передельский Г. И.* Многоплечие мостовые цепи с уравниванием регулируемыми резисторами // Измерительная техника. 1999. № 6. С. 50—54.

Сведения об авторе

Геннадий Иванович Передельский — д-р техн. наук, профессор; Юго-Западный государственный университет, кафедра электроснабжения, Курск;
E-mail: kafedra.es@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
электроснабжения

Поступила в редакцию
16.05.13 г.