
ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.317.733: 621.314.33

Г. И. ПЕРЕДЕЛЬСКИЙ, В. И. ИВАНОВ

МОСТОВАЯ ЦЕПЬ С РАСШИРЕННЫМИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ

Рассмотрена четырехплечая мостовая электрическая цепь с импульсным питанием, которая без изменения конфигурации может быть использована для определения параметров существенно расширенного по сравнению с известными мостами количества многоэлементных $R-C$, $R-L$ и $R-L-C$ -двухполюсников. Для получения расширенных функциональных возможностей в ветвь с уравнивающими элементами вместо одиночного резистора плеча отношения предложено ввести многоэлементный двухполюсник, эквивалентный двухполюснику с уравнивающими элементами.

Ключевые слова: мостовая цепь, многоэлементный двухполюсник, уравнивающие элементы.

Мостовые цепи (МЦ) находят применение в контрольно-измерительной технике, в автоматике и системах управления. Они используются для определения параметров объектов контроля, измерения или исследования (далее — ОКИ), имеющих многоэлементную схему замещения [1, 2]. Традиционно четырехплечая мостовая цепь содержит две параллельно включенные ветви. Смежные плечи отношения в обеих ветвях представлены одиночными резисторами, последовательно с которыми включены многоэлементные двухполюсники (МД). В первой ветви МД содержит регулируемые уравнивающие элементы, а во второй является объектом измерения. Для обеспечения отдельного уравнивания при импульсном питании [3] двухполюсники плеч сравнения должны быть эквивалентными друг другу, а двухполюсник с уравнивающими элементами должен соответствовать одной из известных структур [4].

Недостатком МЦ является их узкая „специализация“: каждый конкретный мост может быть использован для определения параметров некоторого числа вариантов двухполюсников. Если, например, четырехплечая МЦ позволяет определять параметры резистивно-емкостных ($R-C$) многоэлементных двухполюсников, то при необходимости находить параметры резистивно-индуктивных ($R-L$) двухполюсников приходится изменять конфигурацию МЦ, т.е. переходить на другой вариант моста. Этому же требует переход и к двухполюсникам с различными реактивными элементами ($R-L-C$ -двухполюсникам), а также переход от одних вариантов двухполюсников к другим, не эквивалентным первым [3]. С увеличением числа элементов быстро возрастает количество частных вариантов схем двухполюсников. Так, для двухполюсников, содержащих резистивные сопротивления, число вариантов трехэлементных двухполюсников равно 16, четырехэлементных — 78 [3], а пятиэлементных — уже сотни.

Поэтому существует потребность в получении более универсальных МЦ, позволяющих определять параметры возможно большего количества вариантов двухполюсников ОКИ.

Электрические мосты, позволяющие определять параметры многоэлементных $R-C$, $R-L$ и $R-L-C$ -двухполюсников, отнесем к МЦ с расширенными функциональными возможностями.

Использование переключателей и дополнительных соединительных проводников позволяет при переходе от двухполюсников ОКИ одного вида к другим соответственно изменять вариант построения МЦ и, по сути, переходить к другим вариантам мостов, при этом число переключателей и дополнительных проводников может оказаться большим. Это увеличит взаимное влияние цепей, повысит воздействие помех и наводок, кроме того, отрицательное влияние окажут паразитные емкости и индуктивности дополнительных проводников, паразитные параметры цепей коммутации, в частности, прямое и обратное сопротивление ключей, а также временная и температурная нестабильность перечисленных параметров.

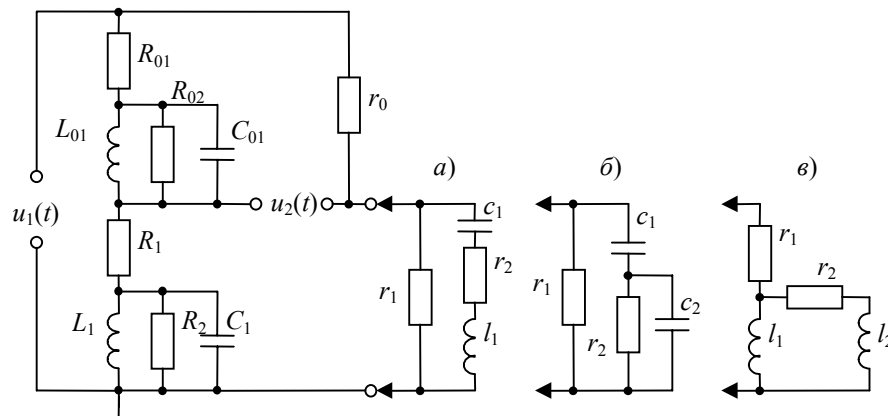
Другой путь расширения функциональных возможностей связан с поиском способа построения МЦ без использования переключателей и дополнительных проводников, чтобы при подключении к одним и тем же выводам моста объектов с различными вариантами их двухполюсных схем замещения конфигурация МЦ оставалась неизменной. Возможность реализации второго пути не очевидна.

В настоящей статье рассмотрена МЦ с расширенными функциональными возможностями, не требующая использования в них переключателей и дополнительных проводников.

Для расширения функциональных возможностей МЦ в ветвь с уравнивающими элементами вместо одиночного резистора следует ввести многоэлементный двухполюсник, эквивалентный двухполюснику с уравнивающими элементами. Построение ветви с двухполюсником ОКИ остается неизменным. Теперь к МЦ можно подключать многоэлементные $R-C$, $R-L$ и $R-L-C$ -двухполюсники и определять их параметры.

В общем случае результаты анализа многоэлементных электрических цепей имеют вид громоздких математических соотношений, исследование МЦ с расширенными функциональными возможностями показало, что соотношения получаются существенно менее громоздкими, если в ветвь с уравнивающими элементами ввести вместо резистора двухполюсник, аналогичный двухполюснику с уравнивающими элементами.

На рисунке приведена в качестве примера конкретная мостовая цепь с расширенными функциональными возможностями, в которой двухполюсник $R_{01}-L_{01}-R_{02}-C_{01}$ включен вместо одиночного резистора плеча отношения; $R_1-L_1-R_2-C_1$ — двухполюсник с уравнивающими элементами, r_0 — одиночный резистор оставшегося плеча отношения. Двухполюсники левой ветви моста одинаковы и соответствуют одной из структур в работе [4]. К МЦ (см. рисунок) подключаются многоэлементные двухполюсники $R-L-C$ (а), $R-C$ (б) и $R-L$ (в) ОКИ.



На МЦ воздействуют импульсы, изменяющиеся по закону степенных функций

$$u_1(t) = \frac{U_m t^k}{t_n^k}, \quad (1)$$

где U_m — амплитуда импульсов, t_n — их длительность, t — текущее время, k принимает значения 0, 1, 2, ... Пусть передаточная функция МЦ n -го порядка (в данном примере $n = 6$) имеет вид

$$K(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \frac{D_0 + D_1 p + D_2 p^2 + \dots + D_n p^n}{d_0 + d_1 p + d_2 p^2 + \dots + d_n p^n}, \quad (2)$$

где D_i, d_i — обобщенные величины, определяемые параметрами элементов МЦ.

Выходное напряжение $u_2(t)$ (напряжение неравновесия) мостовой цепи после окончания переходного процесса описывается выражениями, приведенными в таблице.

k	$u_1(t)$	$U_1(p)$	$u_2(t)$ по окончании переходного процесса
1	U_m	$\frac{U_m}{p}$	$U_m K_0$
2	$\frac{U_m t}{t_n}$	$\frac{U_m}{t_n p^2}$	$\frac{U_m}{t_n} (K_0 t + K_1)$
3	$\frac{U_m t^2}{t_n^2}$	$\frac{2U_m}{t_n^2 p^3}$	$\frac{U_m}{t_n^2} (K_0 t^2 + 2K_1 t + 2K_2)$
4	$\frac{U_m t^3}{t_n^3}$	$\frac{6U_m}{t_n^3 p^4}$	$\frac{U_m}{t_n^3} (K_0 t^3 + 3K_1 t^2 + 6K_2 t + 6K_3)$

Значения коэффициентов K_i определяются параметрами передаточной функции:

$$\left. \begin{aligned} K_0 &= \frac{D_0}{d_0}, \quad K_1 = \frac{D_1 - d_1 K_0}{d_0}, \quad K_2 = \frac{D_2 - d_1 K_1 - d_2 K_0}{d_0}, \\ K_3 &= \frac{D_3 - d_1 K_2 - d_2 K_1 - d_3 K_0}{d_0}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Из анализа данных таблицы и выражений (3) следует, что для уравнивания МЦ необходимо последовательно приводить к нулю значения D_0, D_1, D_2, D_3 . В свою очередь, соотношения для D_i можно представить в виде

$$\left. \begin{aligned} D_0 &= A_1 B_1, \quad D_1 = A_1 B_2 + A_2 B_3, \quad D_2 = A_1 B_4 + A_2 B_5 + A_3 B_6, \\ D_3 &= A_1 B_7 + A_2 B_8 + A_3 B_9 + A_4 B_{10}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где многочлены A_i определяют условия равновесия мостовой цепи:

$$A_i = 0. \quad (5)$$

При включении в МЦ R - L - C варианта ОКИ (см. рисунок, а) условия равновесия через параметры элементов моста находятся следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= r_0 R_1 - r_1 R_{01}, \\ A_2 &= r_0 r_1 c_1 R_1 + r_0 L_1 - r_1 L_{01}, \\ A_3 &= r_0 r_1 c_1 [R_1 R_2 L_{01} + (R_1 + R_2) R_{02} L_1] + r_0 R_2 L_1 (r_2 c_1 R_{02} + L_{01}) - r_1 R_{02} L_{01} (r_2 c_1 R_2 + L_1), \\ A_4 &= r_0 r_1 c_1 [R_1 R_2 R_{02} (L_1 C_1 + L_{01} C_{01}) + (R_1 + R_2) L_1 L_{01}] + \\ &+ r_0 R_2 L_1 [r_2 c_1 L_{01} + R_{02} (l_1 c_1 + L_{01} C_{01})] - r_1 R_{02} L_{01} [r_2 c_1 L_1 + R_2 (l_1 c_1 + L_1 C_1)]. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

При воздействии на мост импульса (1) прямоугольной формы ($k = 0$) плоская вершина импульсного напряжения неравновесия (от окончания переходного процесса до момента окончания питающего импульса) приводится к нулю регулировкой значения сопротивления R_1 , тем самым выполняется первое условие равновесия (6). В случае воздействия на мост импульса (1) линейно изменяющегося напряжения ($k = 1$) плоская вершина напряжения неравновесия приводится к нулю регулировкой значения индуктивности L_1 и выполняется второе условие равновесия (6). При этом не нарушается первое условие равновесия, так как L_1 в него не входит. Если используется питающий импульс (1) квадратичной формы ($k = 2$), то нулевое значение плоской вершины импульсного напряжения неравновесия достигается регулировкой значения сопротивления R_2 , в результате чего выполняется третье условие равновесия (6) (первые два условия равновесия не нарушаются, так как R_2 в них не входит). При поступлении питающего импульса (1) кубической формы ($k = 3$) регулировкой значения емкости C_1 обеспечивается нулевое значение напряжения плоской вершины импульсного напряжения неравновесия, т.е. выполняется четвертое условие равновесия (6). При этом выполняются первые три условия равновесия, потому что C_1 в них не входит.

Таким образом, МЦ (см. рисунок, *a*) обладает свойством раздельного независимого уравнивания, причем уравнивание следует проводить в приведенной выше последовательности R_1, L_1, R_2, C_1 . Из условий равновесия (6) определяются значения параметров: r_1, c_1, r_2, l_1 .

Для полноты анализа ниже приводятся выражения, позволяющие найти обобщенные параметры МЦ $B_1—B_{10}$ (см. рисунок, *a*):

$$\left. \begin{aligned} B_1 &= R_2 R_{02}, \\ B_2 &= r_2 R_2 R_{02} c_1 + R_2 L_{01} + R_{02} L_1, \\ B_3 &= R_2 R_{02}, \\ B_4 &= R_2 R_{02} (L_1 C_1 + L_{01} C_{01} + l_1 c_1) + r_2 c_1 (R_2 L_{01} + R_{02} L_1) + L_1 L_{01}, \\ B_5 &= 0, \\ B_6 &= 1, \\ B_7 &= L_1 L_{01} (r_2 c_1 + R_2 C_1 + R_{02} C_{01}) + l_1 c_1 (R_2 L_{01} + R_{02} L_1) + r_2 R_2 R_{02} c_1 (L_1 C_1 + L_{01} C_{01}), \\ B_8 &= 0, \\ B_9 &= 0, \\ B_{10} &= 1. \end{aligned} \right\} (7)$$

Остальные обобщенные величины находятся из формул:

$$\left. \begin{aligned} D_4 &= A_1 B_{11} + r_0 c_1 L_1 L_{01} [r_1 R_1 (R_2 C_1 + R_{02} C_{01}) + (r_1 + r_2) R_2 R_{02} C_{01} + R_2 l_1] - \\ &\quad - r_1 c_1 R_{02} L_1 L_{01} (r_2 R_2 C_1 + l_1), \\ D_5 &= A_1 B_{12} + r_0 c_1 R_2 R_{02} L_1 L_{01} (C_{01} l_1 + r_1 R_1 C_1 C_{01}) - r_1 c_1 R_2 R_{02} L_1 L_{01} C_1 l_1, \\ D_6 &= A_1 R_2 R_{02} L_1 C_1 L_{01} C_{01} l_1 c_1. \end{aligned} \right\} (8)$$

Значения B_{11} и B_{12} соответственно равны

$$\left. \begin{aligned} B_{11} &= R_2 R_{02} (L_1 C_1 L_{01} C_{01} + L_1 C_1 l_1 c_1 + L_{01} C_{01} l_1 c_1) + c_1 L_1 L_{01} (r_2 R_2 C_1 + r_2 R_{02} C_{01} + l_1), \\ B_{12} &= c_1 L_1 L_{01} [(R_2 C_1 + R_{02} C_{01}) l_1 + r_2 R_2 C_1 R_{02} C_{01}]. \end{aligned} \right\} (9)$$

МЦ (см. рисунок) является квазиуравновешенной, так как нет возможности привести к нулю значения D_4 и D_5 в (8). Все четыре регулируемых параметра в двухполоснике с уравнивающими элементами уже были задействованы на предыдущих четырех этапах уравнивания, и попытка использования любого из них для приведения к нулю какой-либо из обобщенных величин D_4 или D_5 приведет к нарушению одного или нескольких условий

равновесия (5), (6), что недопустимо. Названные обобщенные величины предопределяют в выходном сигнале моста после четырех этапов уравнивания всплески напряжения в начале импульса и после его окончания. Выбросы напряжения определяются суммой затухающих экспоненциальных функций.

При подключении к МЦ резистивно-емкостного варианта ОКИ (см. рисунок, б) условия равновесия определяются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= r_0 R_1 - r_1 R_{01}, \\ A_2 &= r_0 r_1 R_1 c_1 + r_0 L_1 - r_1 L_{01}, \\ A_3 &= r_0 r_1 c_1 [R_1 R_2 L_{01} + (R_1 + R_2) R_{02} L_1] + r_0 R_2 L_1 (r_2 c_1 R_{02} + L_{01}) - \\ &\quad - r_1 R_{02} L_{01} (r_2 c_1 R_2 + L_1), \\ A_4 &= r_0 r_1 c_1 \{ (R_1 + R_2) L_1 L_{01} + r_2 c_2 [R_1 R_2 L_{01} + (R_1 + R_2) R_{02} L_1] + \\ &\quad + R_1 R_2 R_{02} (L_1 C_1 + L_{01} C_{01}) \} + r_0 L_1 L_{01} R_2 [r_2 (c_1 + c_2) + R_{02} C_{01}] - \\ &\quad - r_1 L_1 L_{01} R_{02} [r_2 (c_1 + c_2) + R_2 C_1]. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Из соотношений (10) следует, что при использовании питающих импульсов с изменением напряжения в течение их длительности по закону степенных функций (1) с помощью моста можно осуществлять раздельное зависимое уравнивание в прежней последовательности R_1, L_1, R_2, C_1 . Из условий равновесия (10) берутся отсчеты параметров объекта измерения: r_1, c_1, r_2, c_2 .

Если к МЦ подключается резистивно-индуктивный вариант ОКИ (см. рисунок, в), то условия равновесия определяются через ее параметры так:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= r_0 R_1 - r_1 R_{01}, \\ A_2 &= r_0 L_1 - r_1 L_{01} - R_{01} l_1, \\ A_3 &= r_0 R_2 L_1 (r_2 L_{01} + R_{02} l_1) - r_1 R_{02} L_{01} (r_2 L_1 + R_2 l_1) - \\ &\quad - r_2 l_1 [R_{01} R_{02} L_1 + (R_{01} + R_{02}) R_2 L_{01}], \\ A_4 &= r_0 R_2 L_1 L_{01} (r_2 R_{02} C_{01} + l_1 + l_2) - r_1 R_{02} L_1 L_{01} (r_2 R_2 C_1 + l_1 + l_2) - \\ &\quad - r_2 l_1 [(R_{01} + R_{02}) L_1 L_{01} + R_2 R_{01} R_{02} (L_1 C_1 + L_{01} C_{01})] - \\ &\quad - l_1 l_2 [R_{01} R_{02} L_1 + (R_{01} + R_{02}) R_2 L_{01}]. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Соотношения (11) подтверждают наличие у МЦ раздельного зависимого уравнивания и возможность определения искомых параметров R - L двухполюсника: r_1, l_1, r_2, l_2 .

Для двух последних вариантов МЦ (см. рисунок, б, в) приведены только условия равновесия (10) и (11) и не приведены формулы для остальных обобщенных величин. МЦ прошла проверку с помощью моделирования на ЭВМ и испытана на натурном образце. Испытания подтвердили изложенные в статье положения.

Таким образом, МЦ, приведенная на рисунке, позволяет определять параметры четырехэлементного R - C -двухполюсника и еще трех вариантов эквивалентных ему двухполюсников [3], четырехэлементного R - L -двухполюсника и еще трех вариантов эквивалентных ему двухполюсников, четырехэлементного R - L - C -двухполюсника и трех вариантов эквивалентных, а также обратных (инверсных) ему двухполюсников. Если МЦ построить в традиционном варианте, в частности, вместо многоэлементного двухполюсника R_{01} - L_{01} - R_{02} - C_{01} в плече отношения включить одиночный элемент (резистор), то она пригодна для определения параметров четырехэлементного R - L - C -двухполюсника и еще только одного эквивалентного ему двухполюсника [3], но не может определять параметры R - C и R - L -двухполюсников. Следовательно, в рассмотренной МЦ получено существенное расширение функциональных возможностей.

При необходимости определять в двухполюсниках ОКИ более четырех параметров следует увеличивать в соответствии с работой [4] число элементов в двухполюсниках левой ветви МЦ и использовать питающие импульсы напряжения (1) с более высокими показателями степени k . Тогда значительно возрастает количество вариантов двухполюсников ОКИ, параметры которых определяются одной МЦ, так как существенно увеличивается число эквивалентных двухполюсников при возрастании в них количества элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карандеев К. Б., Штамбергер Г. А. Обобщенная теория мостовых цепей переменного тока. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1961. 224 с.
2. Кнеллер В. Ю., Боровских Л. П. Измерение параметров объектов, представляемых многоэлементными двухполюсниками // Измерение, контроль, автоматизация. 1976. № 3. С. 3—11.
3. Передельский Г. И. Мостовые цепи с импульсным питанием. М.: Энергоатомиздат, 1988. 192 с.
4. Передельский Г. И. О свойстве многоэлементных электрических цепей // Электричество. 1989. № 2. С. 73—75.

Сведения об авторах

- Геннадий Иванович Передельский** — д-р техн. наук, профессор; Курский государственный технический университет, кафедра электротехники, электроники и автоматики
- Владимир Ильич Иванов** — канд. техн. наук, доцент; Курский государственный технический университет, кафедра вычислительной техники;
E-mail: viva@kursknet.ru

Рекомендована кафедрой
электротехники, электроники и автоматики

Поступила в редакцию
20.10.08 г.