

В. И. ИВАНОВ, В. С. ТИТОВ, Д. А. ГОЛУБОВ

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПАРАМЕТРОВ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ДВУХПОЛЮСНИКОВ С УРАВНОВЕШИВАНИЕМ ТОКОВ

Рассмотрены способ и устройство преобразования параметров многоэлементного двухполюсника при воздействии импульсов напряжения, изменяющегося по закону степенной функции времени, и компенсации составляющих тока многоэлементного двухполюсника. По условиям уравнивания токов определяют обобщенные параметры объекта измерения, после чего вычисляют электрические параметры его элементов.

***Ключевые слова:** многоэлементные двухполюсники, обобщенные параметры, уравнивание токов.*

Преобразователи параметров комплексного сопротивления многоэлементного двухполюсника (МДП) предназначены для решения задачи получения информации о каждом из его элементов отдельно. В устройствах, построенных по принципу уравнивающего преобразования, приводится к нулю разность двух активных величин, одна из них формируется измерительной схемой, в которую включен МДП, а вторая — вспомогательной цепью, которая строится таким образом, чтобы значение каждой составляющей компенсирующей величины регулировалось одним пассивным элементом. Параметры уравнивающего сигнала, как

правило, преобразуют в унифицированные величины, функционально связанные с искомыми параметрами объекта измерения [1].

Для выделения из выходного сигнала преобразователя информации только об одном параметре МДП (независимо от остальных) необходимо, чтобы в момент считывания сигнала в нем присутствовала хотя бы одна составляющая, по которой можно получить информацию о параметре, а сумма остальных составляющих стремилась к нулю.

В настоящей статье рассматриваются устройства измерения параметров многоэлементных двухполюсников, в которых для возбуждения измерительной схемы используются импульсы напряжения, форма которых соответствует степенной функции времени вида

$$u_{\text{вх}}(t) = U_m t^n / t_{\text{и}}^n, \quad (1)$$

где $t_{\text{и}}$ — длительность импульса, U_m — амплитуда, n — целочисленный показатель степени. Реакция линейной пассивной двухполюсной цепи на импульсы n -й степени по окончании переходного процесса содержит импульсы, имеющие форму степенных функций с показателями от n до нуля. Таким образом, для уравнивания выходного сигнала можно сформировать компенсирующие импульсы известной формы, довольно просто реализуется избирательность обработки импульсов с одной степенной зависимостью времени, измерительная схема обладает свойством отдельного уравнивания токов.

На рис. 1 представлена схема измерительного преобразователя с уравниванием импульсов тока четырехэлементного двухполюсника компенсирующими импульсами со степенным изменением тока. В данной схеме используются кубические импульсы с $n = 3$. Генератор прямоугольных импульсов (ГПИ) вырабатывает импульсы постоянного напряжения длительностью $t_{\text{и}}$ и амплитудой U_0 . Для формирования импульсов вида (1) применяется цепь из трех последовательно включенных интеграторов. Импульсы напряжения на выходах первого, второго и третьего интегратора имеют форму линейно изменяющегося напряжения, квадратичной и кубической параболы соответственно:

$$u_1(t) = U_1 t / t_{\text{и}}, \quad u_2(t) = U_2 t^2 / t_{\text{и}}^2, \quad u_3(t) = U_3 t^3 / t_{\text{и}}^3. \quad (2)$$

Амплитуды этих импульсов равны

$$U_1 = U_0 t_{\text{и}} / T_1; \quad U_2 = U_0 t_{\text{и}}^2 / 2T_1 T_2; \quad U_3 = U_0 t_{\text{и}}^3 / 6T_1 T_2 T_3, \quad (3)$$

где T_1 , T_2 и T_3 — постоянная времени первого, второго и третьего интегратора.

Импульс напряжения $u_3(t)$ создает в многоэлементном двухполюснике объекта измерения, включенном во входную цепь операционного усилителя ОУ1, импульс тока, который содержит свободную и принужденную составляющие. После завершения переходного процесса и до окончания питающего импульса остается только вынужденная составляющая тока двухполюсника, которая состоит из импульсов тока кубической, квадратичной, линейной и плоской (прямоугольной) формы:

$$i_{\text{дп}}(t) = Y_0 U_3 t^3 / t_{\text{и}}^3 + 3Y_1 U_3 t^2 / t_{\text{и}}^3 + 6Y_2 U_3 t / t_{\text{и}}^3 + 6Y_3 U_3 / t_{\text{и}}^3. \quad (4)$$

Амплитуды этих составляющих зависят от обобщенных параметров проводимости Y_0 , Y_1 , Y_2 , Y_3 объекта измерения:

$$I_3 = Y_0 U_3; \quad I_2 = 3Y_1 U_3 / t_{\text{и}}; \quad I_1 = 6Y_2 U_3 / t_{\text{и}}^2; \quad I_0 = 6Y_3 U_3 / t_{\text{и}}^3. \quad (5)$$

Обобщенные параметры Y_0 , Y_1 , Y_2 , Y_3 определяются операторным изображением проводимости двухполюсника $Y(p)$. Если в общем виде выражение $Y(p)$ представить в виде

$$Y(p) = \frac{b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + \dots}{a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots}, \quad (6)$$

то при ненулевых значениях a_0 и b_0 , что имеет место для большой группы реальных двухполюсников, величина Y_0 , Y_1 , Y_2 , и Y_3 определяется значениями электрических параметров элементов двухполюсника [2]:

$$Y_0 = \frac{b_0}{a_0}; Y_1 = \frac{b_1 - a_1 Y_0}{a_0}; Y_2 = \frac{b_2 - a_2 Y_0 - a_1 Y_1}{a_0}; Y_3 = \frac{b_3 - a_3 Y_0 - a_2 Y_1 - a_1 Y_2}{a_0}; \dots \quad (7)$$

На операционных усилителях ОУ1 и ОУ2 построен дискриминатор токов. При равных значениях сопротивлений $R_1 = R_2 = R_3 = R_0$ напряжение на выходе ОУ2 пропорционально разности входных токов: $U_{\text{ВЫХ}} = (I_{\text{ВХ1}} - I_{\text{ВХ2}}) R_0$.

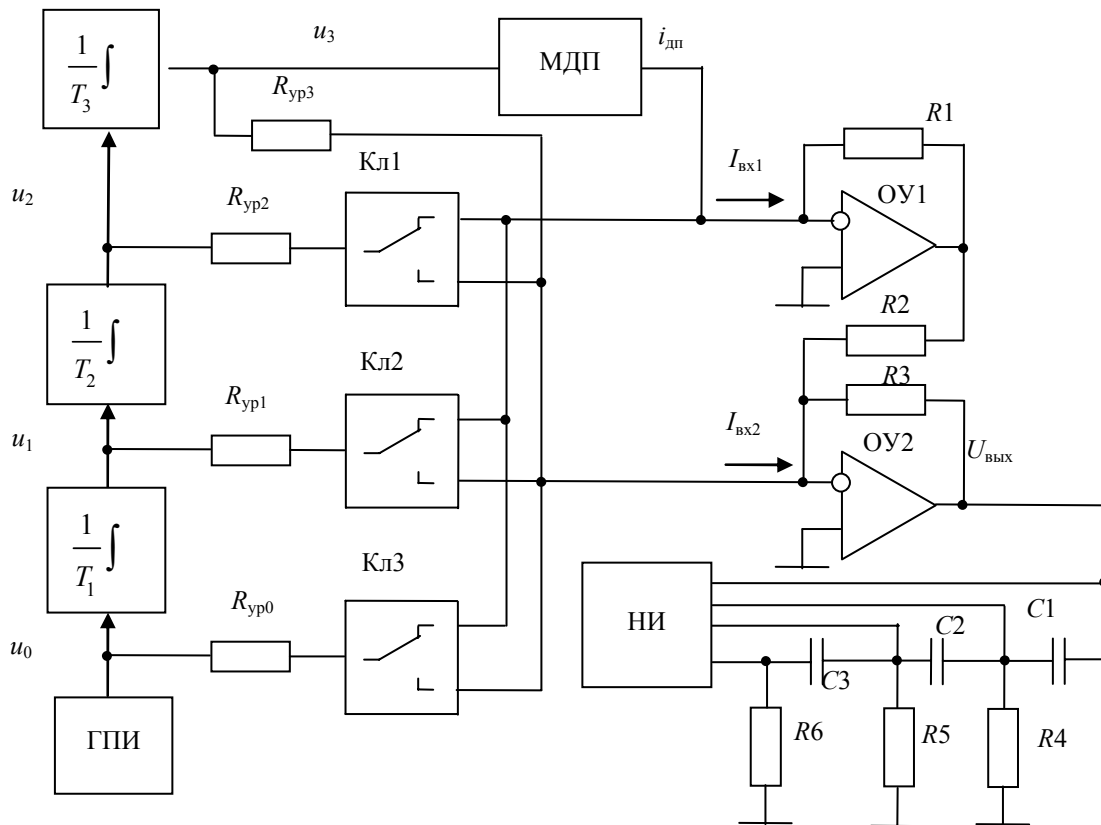


Рис. 1

Оба входа дискриминатора имеют низкое сопротивление $R_{\text{ВХ1}} = R_{\text{ВХ2}} = R_0 / K_{\text{иОУ}}$, где $K_{\text{иОУ}}$ — коэффициент усиления ОУ, поэтому входные токи определяются источниками напряжений и проводимостью соответствующих цепей. Для компенсации всех составляющих тока через МДП используются выходные напряжения интеграторов и генератора прямоугольных импульсов. Уравнивание токов осуществляется регулируемыми резисторами R_{yp3} , R_{yp2} , R_{yp1} , R_{yp0} . Амплитуды импульсов компенсирующего тока кубической, квадратичной, линейной и прямоугольной формы равны соответственно

$$I_{\text{к3}} = U_3 / R_{\text{yp3}}; I_{\text{к2}} = U_2 / R_{\text{yp2}}; I_{\text{к1}} = U_1 / R_{\text{yp1}}; I_{\text{к0}} = U_0 / R_{\text{yp0}}. \quad (8)$$

После уравнивания составляющих тока двухполюсника МДП (5) и составляющих компенсирующего тока (8) по окончании переходного процесса можно, с учетом связей между амплитудами U_3 , U_2 , U_1 и U_0 , найти значения обобщенных параметров проводимости объекта измерения:

$$Y_0 = 1 / R_{\text{yp3}}; Y_1 = T_3 / R_{\text{yp2}}; Y_2 = T_2 T_3 / R_{\text{yp1}}; Y_3 = T_1 T_2 T_3 / R_{\text{yp0}}. \quad (9)$$

Заметим, что значения параметра проводимости Y_0 всегда положительны, а остальных обобщенных параметров, в зависимости от схемы двухполюсника, — могут быть и положительными, и отрицательными. Более того, у двухполюсников с разнородными реактивными элементами знак этого параметра зависит от соотношения между значениями параметров элементов схемы. Поэтому в схеме предусмотрена возможность выбора направления отдельных составляющих компенсирующего тока для уравнивания их с током двухполюсника $i_{дп}(t)$ либо в первую (инвертирующий вход ОУ1), либо во вторую входную цепь (инвертирующий вход ОУ2). Уравнивание следует производить в указанной в (9) последовательности, так как величина Y_0 входит в выражение для Y_1 , значения Y_0 и Y_1 — в формулу для Y_2 , Y_0 , Y_1 и Y_2 — для Y_3 . Из формул (9) видно, насколько важно поддерживать точные и стабильные значения параметров интеграторов.

Для того чтобы избирательно регулировать амплитуду каждой составляющей компенсирующего тока, выходное напряжение дискриминатора подается на трехкаскадный дифференциатор, который содержит три последовательно включенных дифференцирующих RC -звена. Для уменьшения длительности переходного процесса в дифференциаторе целесообразно при одинаковых значениях постоянной времени всех трех RC -звеньев установить значения емкостей конденсаторов и сопротивлений резисторов в каждом каскаде различными: $C_1 = C/m$, $R_4 = mR$, $C_2 = C$, $R_5 = R$, $C_3 = mC$, $R_6 = R/m$, где $m < 1$.

На выходе третьего каскада дифференциатора формируется импульс постоянного напряжения $u_{3RC}(t)$, пропорционального разности амплитуд кубических составляющих тока двухполюсника и компенсирующего сигнала:

$$u_{3RC}(t) = 6(RC)^3 R_0 U_3 (Y_0 - 1/R_{yp3}) / t_{и}^3. \quad (10)$$

Компенсация кубической составляющей осуществляется приведением к нулю напряжения $u_{3RC}(t)$ с помощью регулируемого сопротивления R_{yp3} .

После уравнивания кубических составляющих токов на выходе второго RC -звена формируется импульс постоянного напряжения $u_{2RC}(t)$, пропорционального разности амплитуд квадратичных составляющих тока двухполюсника и компенсирующего сигнала:

$$u_{2RC}(t) = 2(RC)^2 R_0 (3Y_1 U_3 / t_{и}^3 - U_2 / R_{yp2} t_{и}^2). \quad (11)$$

Компенсация квадратичной составляющей осуществляется приведением к нулю напряжения $u_{2RC}(t)$ с помощью сопротивления R_{yp2} . При этом нуль-индикатор (НИ) определяет полярность квадратичной составляющей компенсирующего тока и переключает ключ Кл1 в требуемое положение.

Затем с помощью НИ на выходе первого дифференцирующего RC -звена анализируется импульс постоянного напряжения $u_{1RC}(t)$, которое пропорционально разности амплитуд линейных составляющих тока двухполюсника и компенсирующего сигнала:

$$u_{1RC}(t) = (RC) R_0 (6Y_2 U_3 / t_{и}^3 - U_1 / R_{yp1} t_{и}). \quad (12)$$

Компенсация линейной составляющей осуществляется приведением к нулю напряжения путем регулирования сопротивления R_{yp1} . Нуль-индикатор определяет знак линейной составляющей компенсирующего тока и управляет переключением второго аналогового ключа Кл2.

И, наконец, для компенсации постоянной составляющей импульса тока измеряемого двухполюсника определяется полярность и приводится к нулю регулировкой сопротивления R_{yp0} выходное напряжение ОУ2, которое подается на четвертый вход НИ,

$$u_{OУ2}(t) = R_0 \left(6Y_3 U_3 / t_{и}^3 - U_0 / R_{yp0} \right), \quad (13)$$

при этом НИ определяет знак постоянной составляющей компенсирующего тока и управляет переключением третьего аналогового ключа КЛ3.

После четырех этапов уравнивания тока двухполюсника $i_{дп}(t)$ и компенсирующего тока с помощью формул (9) вычисляются обобщенные параметры проводимости двухполюсника Y_0, Y_1, Y_2, Y_3 . На этом завершается унифицированная часть алгоритма измерителя, единая для любого двухполюсника с пассивными элементами типа $R-C$, $R-L$ или $R-L-C$.

Далее с использованием полученных значений Y_0, Y_1, Y_2, Y_3 и выражений для обобщенных параметров проводимости конкретного МДП вычисляются электрические параметры элементов этого двухполюсника.

На рис. 2 приведены примеры четырехэлементных двухполюсников: резистивно-емкостного ($R-C$) типа (рис. 2, а), резистивно-индуктивного ($R-L$) типа (рис. 2, б) и двухполюсников с разнородными ($R-L-C$) реактивными элементами (рис. 2, в и г). У $R-C$ -двухполюсника и $R-C-L$ -двухполюсника три обобщенных параметра проводимости Y_0, Y_1 и Y_2 определяются одинаковыми выражениями: $Y_0 = 1/R_1$; $Y_1 = C_1$; $Y_2 = -R_2 C_1^2$. Четвертый параметр $R-C$ -двухполюсника равен $Y_3 = R_2^2 C_1^2 (C_1 + C_2)$, а у $R-C-L$ -двухполюсника $Y_3 = C_1^2 (R_2^2 C_1 - L_1)$. Три обобщенных параметра проводимости Y_0, Y_1 и Y_2 $R-L$ -двухполюсника (рис. 2, б) и $R-L-C$ -двухполюсника (г) тоже описываются одинаковыми выражениями $Y_0 = 1/R_1$; $Y_1 = -L_1/R_1^2$; $Y_2 = L_1^2 (R_1 + R_2)/R_1^3 R_2$. Четвертый параметр определяется для двухполюсников $R-L$ и $R-L-C$ формулами $Y_3 = -(L_1^2/R_1^2 R_2^2) (L_1 (R_1 + R_2)^2 / R_1^2 + L_2)$ и $Y_3 = (L_1^2/R_1^2) (C_1 - L_1 (R_1 + R_2)^2 / R_1^2 R_2^2)$ соответственно. Подставив в эти уравнения полученные значения Y_0, Y_1, Y_2, Y_3 , можно вычислить электрические параметры элементов МДП.

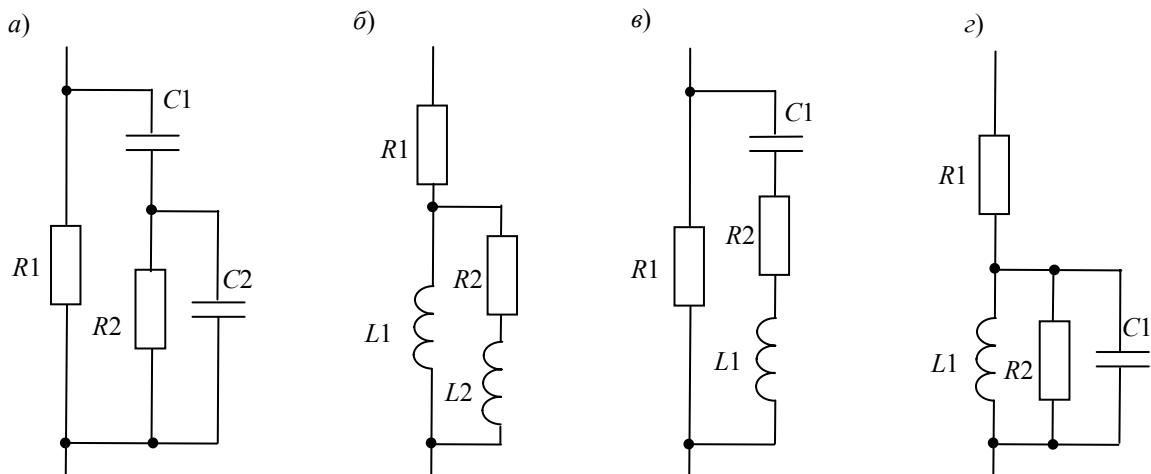


Рис. 2

Таким образом, рассмотренный способ и устройство пригодны для определения параметров широкого класса многоэлементных пассивных двухполюсных цепей RC -, RL - и RLC -типа. Представление измеряемых параметров МДП с помощью его обобщенных параметров обеспечивает универсальность алгоритма преобразования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мартяшин А. И., Куликовский К. Л., Куроедов С. К., Орлова Л. В.* Основы инвариантного преобразования параметров электрических цепей. М.: Энергоатомиздат, 1990. 214 с.
2. *Иванов В. И., Титов В. С., Голубов Д. А.* Применение обобщенных параметров измерительной цепи для идентификации многоэлементных двухполюсников // Датчики и системы. 2010. № 8. С. 43—45.

Сведения об авторах

- Владимир Ильич Иванов** — канд. техн. наук, доцент; Юго-Западный государственный университет, кафедра вычислительной техники, Курск; E-mail: viva37@mail.ru
- Виталий Семенович Титов** — д-р техн. наук, профессор; Юго-Западный государственный университет, кафедра вычислительной техники, Курск; заведующий кафедрой
- Дмитрий Александрович Голубов** — аспирант; Юго-Западный государственный университет, кафедра вычислительной техники, Курск

Рекомендована Юго-Западным
государственным университетом

Поступила в редакцию
24.10.11 г.