

В. И. ИВАНОВ

МОДЕЛИ

АЛГОРИТМОВ И УСТРОЙСТВ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ RLC-ДАТЧИКОВ

НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВУХПОЛЮСНИКОВ.

ЧАСТЬ 2

Представлены результаты исследований алгоритмов и устройств преобразования параметров многоэлементных двухполюсников с нулевым и бесконечным сопротивлением на постоянном токе. Рассмотрены преобразователи параметров RLC-двухполюсников с дифференцированием сигналов в измерительной схеме.

Ключевые слова: многоэлементный двухполюсник, степенной импульс, обобщенные параметры, преобразователь параметров.

Введение. Рассмотренные в первой части статьи алгоритмы идентификации пассивных датчиков, основанные на методе обобщенных параметров, разработаны для объектов с конечным (ненулевым и небесконечным) сопротивлением между полюсами на постоянном токе. Два способа воздействия на двухполюсники (ДП) — импульсами напряжения или импульсами тока, имеющего вид степенной функции, — равноценны и по аппаратной реализации, и по сложности аналитических выражений [1, 2]. Однако среди различных датчиков важное место занимают двухполюсники с коротким замыканием или обрывом цепи на постоянном токе между полюсами. Рассмотрим влияние конфигурации схемы ДП и вида тестового сигнала на аппаратные издержки измерительных устройств и сложность вычислительных процедур [3—5].

Преобразование параметров ДП с нулевым сопротивлением на постоянном токе.

Если в схеме замещения ДП присутствует индуктивный элемент, включенный между полюсами, он закорачивает внешние выводы для постоянного тока. В этом случае в знаменателе формулы комплексной проводимости $Y(p)$ свободный член a_0 равен нулю. А в числителе формулы комплексного сопротивления $Z(p)$ нулю равен свободный член b_0 . Рассмотрим особенности применения метода обобщенных параметров сопротивления и проводимости двухполюсника с коротким замыканием между полюсами при возбуждении его импульсами тока и напряжения на примере четырехэлементного двухполюсника (рис. 1). Операторное изображение сопротивления имеет вид

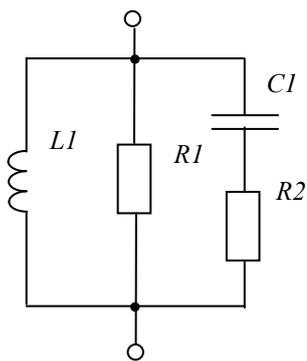


Рис. 1

$$Z(p) = \frac{pR_1L_1 + p^2R_1R_2L_1C_1}{R_1 + p(L_1 + R_1R_2C_1) + p^2(R_1 + R_2)L_1C_1}.$$

В числителе выражения для $Z(p)$ отсутствует свободный член, поэтому $Z_0 = 0$. Следовательно, при возбуждении ДП импульсом тока $i_{\text{ДП}}(t) = I_m t^n / t_{\text{и}}^n$ в реакции двухполюсника всегда будет отсутствовать составляющая напряжения n -й степени. Для определения N параметров ДП потребуется повысить степень импульса тока, по меньшей мере, до N -й. Например, для преобразования параметров рассматриваемого четырехэлементного ДП требуется импульс четвертой степени. Обобщенные Z -параметры ДП равны

$$Z_0 = 0; \quad Z_1 = L_1; \quad Z_2 = -L_1^2/R_1; \quad Z_3 = L_1^2(L_1 - R_1^2 C_1)/R_1^2;$$

$$Z_4 = (R_1 + R_2)L_1^2 C_1^2 - L_1^2(L_1 - R_1^2 C_1)^2/R_1^3.$$

Напряжение на двухполюснике содержит четыре составляющие импульса:

$$u_{\text{ДП}}(t) = 4Z_1 I_m t^3/t_n^4 + 12Z_2 I_m t^2/t_n^4 + 24Z_3 I_m t/t_n^4 + 24Z_4 I_m/t_n^4.$$

При возбуждении ДП импульсом напряжения в качестве системной функции объекта служит операторное изображение проводимости:

$$Y(p) = \frac{R_1 + p(L_1 + R_1 R_2 C_1) + p^2(R_1 + R_2)L_1 C_1}{pR_1 L_1 + p^2 R_1 R_2 L_1 C_1}.$$

В знаменателе этого выражения отсутствует свободный член, поэтому применение формул [1, 2] для определения Y -параметров невозможно. Вынесенный из выражения для $Y(p)$ оператор p отнесем к выражению входного воздействия — импульса напряжения. Операторное изображение тока в двухполюснике от этого не изменится:

$$I_{\text{ДП}}(p) = U^*(p)Y^*(p) = \frac{n!U_m}{t_n^n p^{n+2}} \frac{R_1 + p(L_1 + R_1 R_2 C_1) + p^2(R_1 + R_2)L_1 C_1}{R_1 L_1 + pR_1 R_2 L_1 C_1}.$$

Здесь $U^*(p)$ и $Y^*(p)$ — модифицированные выражения для входного воздействия и проводимости двухполюсника:

$$U^*(p) = \frac{U(p)}{p}; \quad Y^*(p) = \frac{R_1 + p(L_1 + R_1 R_2 C_1) + p^2(R_1 + R_2)L_1 C_1}{R_1 L_1 + pR_1 R_2 L_1 C_1}.$$

Обобщенные параметры проводимости $Y^*(p)$ равны

$$Y_{-1}^* = 1/L_1; \quad Y_0^* = 1/R_1; \quad Y_1^* = C_1; \quad Y_2^* = -R_2 C_1^2.$$

Оператор интегрирования $1/p$ повышает показатель степени тестового сигнала, поэтому старшая степень импульса тока на единицу больше степени импульса напряжения. Так, для определения четырех Y -параметров достаточно импульсов напряжения второй степени $u_{\text{ДП}}(t) = U_m t^2/t_n^2$. Ток двухполюсника содержит четыре составляющие

$$i_{\text{ДП}}(t) = Y_{-1} U_m t^3/(3t_n^2) + Y_0 U_m t^2/t_n^2 + 2Y_1 U_m t/t_n^2 + 2Y_2 U_m/t_n^2.$$

Для унификации моделей ДП обозначения индексов Y -параметров сдвинуты на единицу в меньшую сторону, чтобы параметру Y_0 соответствовала степень выходного импульса, совпадающая со степенью входного сигнала. Таким образом, при возбуждении „короткозамкнутого“ ДП импульсом напряжения процедура измерения обобщенных параметров и вычисления измеряемых величин упрощается.

Преобразование параметров ДП с бесконечным сопротивлением на постоянном токе. Если в схеме замещения ДП между полюсами присутствует емкостной элемент, он создает обрыв цепи для постоянного тока. В этом случае свободный член a_0 в знаменателе формулы комплексного сопротивления равен нулю. Рассмотрим на примере четырехэлементного ДП (рис. 2) особенности применения метода обобщенных Y - и Z -параметров двухполюсника с бесконечным сопротивлением между полюсами на постоянном токе при возбуждении его импульсами напряжения или тока.

Если в качестве тестового сигнала используется импульс напряжения, следует обратить внимание на вид операторного изображения проводимости:

$$Y(p) = \frac{pR_2 C_1 + p^2 L_1 C_1}{R_2 + p(L_1 + R_1 R_2 C_1) + p^2(R_1 + R_2)L_1 C_1}.$$

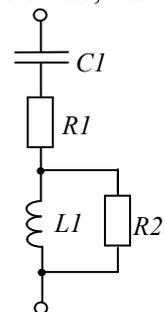


Рис. 2

Так как в числителе выражения $Y(p)$ отсутствует свободный член, параметр Y_0 тождественно равен нулю. При возбуждении ДП импульсом напряжения $u_{\text{ДП}}(t) = U_m t^n / t_n^n$ в реакции двухполюсника будет отсутствовать составляющая тока n -й степени. Для определения N параметров ДП потребуется импульс тока, по меньшей мере, N -й степени. Например, для преобразования параметров четырехэлементного ДП (см. рис. 2) требуется импульс четвертой степени. Обобщенные Y -параметры ДП равны

$$Y_0 = 0; \quad Y_1 = C_1; \quad Y_2 = -R_1 C_1^2; \quad Y_3 = C_1^2 (R_1^2 C_1 - L_1); \\ Y_4 = C_1^2 (R_1 R_2 C_1 + L_1)^2 / R_2 - R_1^2 (R_1 + R_2) C_1^4.$$

Если для возбуждения ДП применяется импульс тока, следует учитывать особенности операторного изображения сопротивления ДП:

$$Z(p) = \frac{R_1 + p(L_1 + R_1 R_2 C_1) + p^2 (R_1 + R_2) L_1 C_1}{p R_1 L_1 + p^2 R_1 R_2 L_1 C_1}.$$

В знаменателе этого выражения отсутствует свободный член, поэтому следует применить модифицированные выражения для входного тока и операторного сопротивления. Вынесенный из выражения для $Z(p)$ оператор p отнесем к выражению входного воздействия — импульса тока:

$$Z^*(p) = \frac{R_1 + p(L_1 + R_1 R_2 C_1) + p^2 (R_1 + R_2) L_1 C_1}{R_1 L_1 + p R_1 R_2 L_1 C_1}.$$

Обобщенные параметры сопротивления $Z^*(p)$ равны

$$Z_{-1} = 1/C_1; \quad Z_0 = R_1; \quad Z_1 = L_1; \quad Z_2 = -L_1^2/R_2.$$

Двухполюсник с $a_0 = 0$ обладает свойством интегратора, что повышает показатель степени тестового импульса. При воздействии на двухполюсник импульсом тока квадратичной формы напряжение содержит четыре составляющие импульса

$$u_{\text{ДП}}(t) = Z_{-1} I_m t^3 / (3t_n^2) + Z_0 I_m t^2 / t_n^2 + 2Z_1 I_m t / t_n^2 + 2Z_2 I_m / t_n^2.$$

Как видно, при измерении обобщенных параметров двухполюсников с разрывом цепи между полюсами приоритет следует отдать измерителям с возбуждением ДП импульсами тока.

Преобразователи параметров ДП с дифференцированием сигналов. Представляют интерес разработки преобразователей обобщенных параметров RLC -двухполюсников с применением операций дифференцирования сигналов на входе и выходе измерительной схемы [3, 5, 6]. Предлагаемый способ преобразования параметров ДП поясняется на примере четырехэлементного двухполюсника. Измерительная цепь на рис. 3 представляет собой делитель напряжения $Z_0—Z(p)$, составленный из последовательно включенных образцового, обычно одноэлементного, двухполюсника Z_0 и ДП объекта измерения с комплексным сопротивлением $Z(p)$. Генератор импульсов напряжения (ГИН) формирует тестовые импульсы, имеющие форму кубической параболы:

$$u_{10}(t) = U_m t^3 / t_n^3. \quad (1)$$

Принужденная составляющая реакции ИС состоит из импульсов кубической, квадратичной, линейной и прямоугольной формы:

$$u_{20}(t) = H_0 U_m t^3 / t_n^3 + 3H_1 U_m t^2 / t_n^3 + 6H_2 U_m t / t_n^3 + 6H_3 U_m / t_n^3, \quad (2)$$

где H_0, H_1, H_2, H_3 — обобщенные параметры передаточной функции делителя Z_0 – Z .

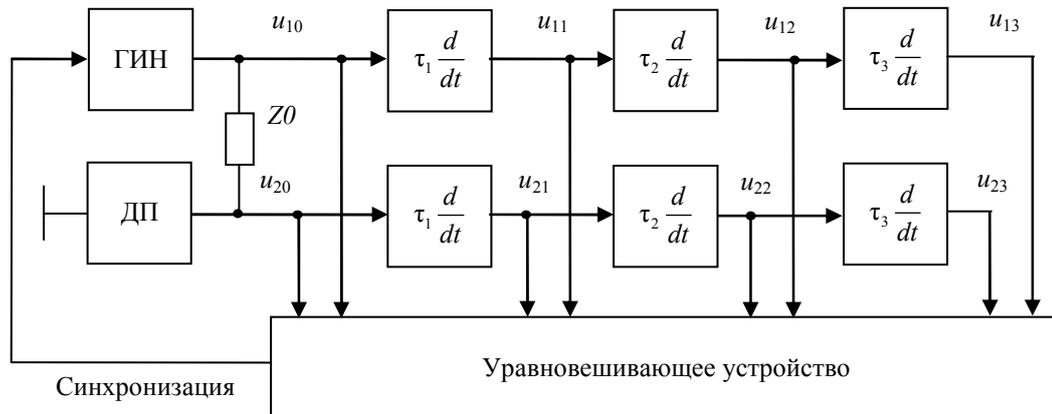


Рис. 3

Для реализации предлагаемого алгоритма преобразования необходимо, чтобы в знаменателе и числителе передаточной функции делителя присутствовали свободные члены $a_0 \neq 0$ и $b_0 \neq 0$. С этой целью, если ДП имеет конечное (ненулевое и небесконечное) сопротивление для постоянного тока, в качестве образцового двухполюсника используют образцовый резистор R_0 , при нулевом сопротивлении ДП — образцовую катушку индуктивности L_0 , а если на постоянном токе ДП имеет бесконечное сопротивление — образцовый конденсатор C_0 . Для определения обобщенных параметров четырехэлементного ДП применяется n -кратное дифференцирование питающих импульсов $u_{10}(t)$ и сигнала $u_{20}(t)$ с выхода ИС. Каждый канал дифференцирования состоит из n последовательно включенных идентичных дифференцирующих каскадов. Положим, что все дифференцирующие каскады в обоих каналах имеют идеальную передаточную функцию $K(p) = p\tau$ с одинаковыми значениями постоянной времени τ . Напряжение на выходах первого канала дифференцирования имеет форму квадратичного, линейного и прямоугольного импульсов соответственно:

$$u_{11}(t) = 3\tau U_m t^2 / t_n^3; \quad (3)$$

$$u_{12}(t) = 6\tau^2 U_m t / t_n^3; \quad (4)$$

$$u_{13}(t) = 6\tau^3 U_m / t_n^3. \quad (5)$$

Напряжения на выходах дифференцирующих каскадов второго канала соответственно равны

$$u_{21}(t) = 3\tau H_0 U_m t^2 / t_n^3 + 6\tau H_1 U_m t / t_n^3 + 6\tau H_2 U_m / t_n^3; \quad (6)$$

$$u_{22}(t) = 6\tau^2 H_0 U_m t / t_n^3 + 6\tau^2 H_1 U_m / t_n^3; \quad (7)$$

$$u_{23}(t) = 6\tau^3 H_0 U_m / t_n^3. \quad (8)$$

Из уравнений (1)–(8) можно определить обобщенные параметры ИС с включенным в нее двухполюсником:

$$H_0 = u_{23} / u_{13}; \quad (9)$$

$$H_1 = (u_{22} / u_{12} - u_{23} / u_{13}) \cdot t; \quad (10)$$

$$H_2 = (u_{21} / u_{11} - 2u_{22} / u_{12} + u_{23} / u_{13}) \cdot t^2 / 2; \quad (11)$$

$$H_3 = (u_{\text{мдп}} / u_{\text{имп}} - 3u_{21} / u_{11} + 3u_{22} / u_{12} - u_{23} / u_{13}) \cdot t^3 / 6. \quad (12)$$

Как видно, процедура определения обобщенных параметров H_0, H_1, H_2, H_3 имеет универсальный характер и не привязана к конкретной модели пассивного многоэлементного

двухполюсника. Кроме того, в выражения (9)—(12) для обобщенных параметров не входит значение амплитуды питающих импульсов, следовательно, устраняются погрешности измерений, обусловленные ее нестабильностью.

Дифференцирующие каскады с передаточной функцией $K(p) = p\tau$, построенные на операционных усилителях, работают неустойчиво, и для стабилизации применяют частотную коррекцию ОУ в области высоких частот. Для этого во входную цепь ОУ включают корректирующий резистор с небольшим сопротивлением $R_{\text{кор}} \ll R$, или в цепь обратной связи включают корректирующий конденсатор небольшой емкости $C_{\text{кор}} \ll C$. Обозначим $R_{\text{кор}} = mR$, $C_{\text{кор}} = mC$ ($m \ll 1$). В обоих случаях передаточная функция одного каскада дифференциатора имеет вид

$$K_1(p) = \frac{pRC}{1 + pmRC} = \frac{p\tau}{1 + pm\tau}, \quad (13)$$

где $\tau = RC$ — постоянная времени дифференцирующего каскада.

Передаточные функции двух и трех последовательно включенных дифференциаторов перемножаются:

$$K_2(p) = \frac{(p\tau)^2}{(1 + pm\tau)^2} = \frac{p^2\tau^2}{1 + 2pm\tau + p^2m^2\tau^2}; \quad (14)$$

$$K_3(p) = \frac{(p\tau)^3}{(1 + pm\tau)^3} = \frac{p^3\tau^3}{1 + 3pm\tau + 3p^2m^2\tau^2 + p^3m^3\tau^3}. \quad (15)$$

Сигналы на выходах каскадов первого дифференциатора в момент времени t равны

$$u_{11}(t) = \frac{3\tau U_m (t^2 - 2m\tau t + 2m^2\tau^2)}{t_{\text{и}}^3}; \quad (16)$$

$$u_{12}(t) = \frac{6\tau^2 U_m (t - 2m\tau)}{t_{\text{и}}^3}; \quad (17)$$

$$u_{13}(t) = \frac{6\tau^3 U_m}{t_{\text{и}}^3}. \quad (18)$$

Сигналы на выходах каскадов второго дифференциатора после окончания переходного процесса в измерительной цепи равны

$$u_{21}(t) = \frac{3\tau H_0 U_m (t^2 - 2m\tau t + 2m^2\tau^2)}{t_{\text{и}}^3} + \frac{6\tau H_1 U_m (t - m\tau)}{t_{\text{и}}^3} + \frac{6\tau H_2 U_m}{t_{\text{и}}^3}; \quad (19)$$

$$u_{22}(t) = \frac{6\tau^2 H_0 U_m (t - 2m\tau)}{t_{\text{и}}^3} + \frac{6\tau^2 H_1 U_m}{t_{\text{и}}^3}; \quad (20)$$

$$u_{23}(t) = \frac{6\tau^3 H_0 U_m}{t_{\text{и}}^3}. \quad (21)$$

Из уравнений (16)—(21) можно определить обобщенные параметры ИС с включенным в нее двухполюсником:

$$H_0 = \frac{u_{23}}{u_{13}}; \quad (22)$$

$$H_1 = \left(\frac{u_{22}}{u_{12}} - \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) (t - 2m\tau); \quad (23)$$

$$H_2 = \left(\frac{u_{21}}{u_{11}} - 2 \frac{u_{22}}{u_{12}} + \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) \left(\frac{t^2}{2} - m\tau t + m^2 \tau^2 \right) + \left(\frac{u_{22}}{u_{12}} - \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) m\tau t; \quad (24)$$

$$H_3 = \left(\frac{u_2}{u_1} - 3 \frac{u_{21}}{u_{11}} + 3 \frac{u_{22}}{u_{12}} - \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) \frac{t^3}{6} + \left(\frac{u_{21}}{u_{11}} - 2 \frac{u_{22}}{u_{12}} + \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) (m\tau t^2 - m^2 \tau^2 t) + \left(\frac{u_{22}}{u_{12}} - \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) m^2 \tau^2 t. \quad (25)$$

Рассмотренный способ прямого преобразования обобщенных параметров пассивных двухполюсных цепей RC-, RL- и RLC-типа может найти применение при создании измерителей параметров многоэлементных двухполюсников с широкими функциональными возможностями и повышенным быстродействием.

Для упрощения аппаратуры вместо дифференцирующих каскадов на ОУ в устройствах прямого преобразования параметров ДП с дифференцированием сигналов можно использовать пассивные дифференцирующие RC-звенья [6]. При равных значениях постоянной времени τ в каждой RC-цепи устанавливают разные емкости и сопротивления: $C_2 = mC_1$; $C_3 = mC_2$; $R_2 = R_1/m$; $R_3 = R_2/m$, где $m < 1$. Обобщенные параметры делителя $Z_0-Z(p)$, в который включен ДП объекта измерения, равны

$$H_0 = \frac{u_{23}}{u_{13}};$$

$$H_1 = \left(\frac{u_{22}}{u_{12}} - \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) (t - 2(1+m)\tau);$$

$$H_2 = \left(\frac{u_{21}}{u_{11}} - 2 \frac{u_{22}}{u_{12}} + \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) \left(\frac{t^2}{2} - (1+m)\tau t + (1+m)^2 \tau^2 \right) + \left(\frac{u_{22}}{u_{12}} - \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) (1+m)\tau t;$$

$$H_3 = \left(\frac{u_{20}}{u_{10}} - 3 \frac{u_{21}}{u_{11}} + 3 \frac{u_{22}}{u_{12}} - \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) \frac{t^3}{6} + \left(\frac{u_{21}}{u_{11}} - 2 \frac{u_{22}}{u_{12}} + \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) \left((1+m)\tau t^2 - (1+m)^2 \tau^2 t \right).$$

Заключение. В настоящей работе предложен ряд алгоритмов и устройств параметрической идентификации многоэлементных RLC-двухполюсников с коротким замыканием и разрывом цепи между полюсами на постоянном токе, а также рассмотрено применение операции дифференцирования измерительных сигналов, позволяющих расширить функциональные возможности и повысить быстродействие измерительной аппаратуры.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ НШ-2357.2014.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.

2. *Иванов В. И., Титов В. С.* Эквивалентные преобразования обобщенных параметров двухполюсников при идентификации сложных измерительных цепей // Датчики и системы. 2012. № 5. С. 11—16.
3. *Иванов В. И.* Теория и применение обобщенных параметров *RLC*-двухполюсников. Курск: Юго-Западный гос. ун-т, 2013. 136 с.
4. *Иванов В. И., Титов В. С., Петров А. С.* Преобразователи параметров многоэлементных двухполюсников с коротким замыканием и разрывом цепи между полюсами на постоянном токе // Измерительная техника. 2014. № 3. С. 58—61. *Ivanov V. I., Titov V. S., Petrov A. S.* Converters of the parameters of multicomponent two-terminal networks with a dc short circuit and a break in the circuit between poles // Measurement Techniques. 2014. Vol. 57, N 3. P. 340—345.
5. *Иванов В. И., Титов В. С., Петров А. С.* Преобразователи параметров многоэлементных двухполюсников с дифференцированием сигналов // Измерительная техника. 2012. № 9. С. 51—54; *Ivanov V. I., Titov V. S., Petrov A. S.* Conversion of the parameters of multicomponent two-terminal networks with signal differentiation // Measurement Techniques. 2012. Vol. 55, N 9. P. 1071—1076 .
6. *Ivanov V. I., Titov V. S.* Direct Conversation of Generalized Parameters of Multicomponent Two-Terminal Networks Using Capacitive Differentiator *RC*-Chains // Published by Canadian Center of Science and Education. Mechanical Engineering Research. 2014. Vol. 4, N 1. P. 36—42.

Сведения об авторе

Владимир Ильич Иванов

— канд. техн. наук, доцент; Юго-Западный государственный университет, кафедра вычислительной техники, Курск; E-mail: viva37@mail.ru

Рекомендована Юго-Западным
государственным университетом

Поступила в редакцию
10.09.14 г.