

Преобразователи параметров многоэлементных двухполюсников с коротким замыканием и разрывом цепи между полюсами на постоянном токе

В. И. ИВАНОВ, В. С. ТИТОВ, А. С. ПЕТРОВ

Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия, e-mail: viva37@mail.ru

Рассмотрены особенности алгоритмов и аппаратных средств для определения параметров пассивных многоэлементных двухполюсников с коротким замыканием между полюсами через индуктивный элемент и разрывом цепи на постоянном токе. Измерительная схема питается импульсами напряжения, изменяющегося по закону функции n -й степени времени, n -кратного дифференцирования сигналов на входе и выходе схемы. Обобщенные параметры передаточной функции вычисляются через отношения сигналов в каждом канале дифференцирования.

Ключевые слова: многоэлементные двухполюсники, обобщенные параметры, преобразование параметров.

The peculiarities of algorithms and hardware for determination of parameters of passive multielement dipoles with a short-circuit between the poles through the inductive element and break in the circuit at direct current based on feeding of the measuring circuit (MC) by voltage pulses changing according to the function of n -th degree of time, n -times differentiation signals at the MC input and output and the computation of generalized parameters of transfer function through the ratio of signals from each differentiation channel — are considered.

Key words: multielement dipoles, generalized parameters, transformation of parameters.

В [1] предложены способ и схемы устройств преобразования параметров пассивных многоэлементных двухполюсников (МДП) с возбуждением измерительной цепи, которая содержит делитель напряжения, состоящий из образцового элемента и исследуемого двухполюсника, импульсами напряжения $u_{10}(t)$, изменяющегося по закону n -й степени времени:

$$u_{10}(t) = U_m t^n / t_{\text{имп}}^n,$$

где U_m , $t_{\text{имп}}$ — амплитуда и длительность тестовых импульсов.

В установившемся режиме после завершения переходного процесса сигнал на выходе делителя представляет сумму импульсов напряжения, имеющих форму степенных функций с показателями от n до нуля:

$$u_{20}(t) = \frac{n! U_m}{t_{\text{имп}}^n} \left(\frac{H_0 t^n}{n!} + \frac{H_1 t^{n-1}}{(n-1)!} + \frac{H_2 t^{n-2}}{(n-2)!} + \dots + H_n \right),$$

где $H_0, H_1, \dots, H_n$ — обобщенные параметры передаточной функции делителя напряжения, содержащие информацию об электрических параметрах МДП [2].

Способ основан на n -кратном дифференцировании напряжения импульсов u_{10} , питающих делитель, и сигнала u_{20} на двухполюснике и последующем вычислении значений H -параметров с использованием частных от деления отсчетов сигналов на выходах соответствующих каскадов обоих дифференциаторов: u_{20}/u_{10} , u_{21}/u_{11} , u_{22}/u_{12} , u_{23}/u_{13} , ... [3]. Также в [1] рассмотрены примеры RLC-двухполюсников с конечным (ненулевым и небесконечным) сопротивлением между полюсами на постоянном токе. В настоящей работе проанализированы особенности применения метода обобщенных параметров для двухполюсников с коротким замыканием между полюсами через индуктивный элемент и с обрывом цепи между полюсами из-за емкостного элемента.

На рис. 1, а, б представлен трехэлементный двухполюсник $L_1-R_1-C_1$, в котором индуктивный элемент создает короткое замыкание между полюсами. В качестве образцовых элементов использованы резистор см. рис. 1, а и катушка индуктивности (см. рис. 1, б). К достоинствам первой схемы относятся более низкая стоимость образцового элемента, доступность, возможность выбора необходимого номинала сопротивления. К тому же эта схема применима и для двухполюсников с конечным сопротивлением. Сравним функциональные возможности обоих вариантов измерительной схемы.

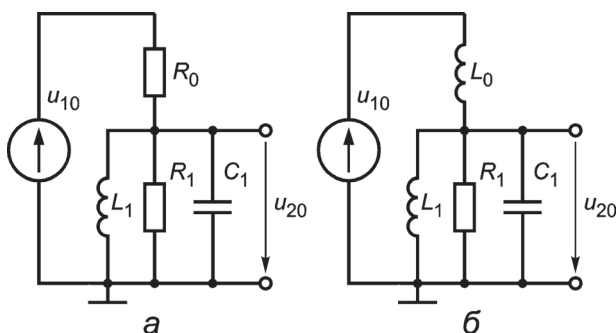


Рис. 1. Измерительные схемы двухполюсника с индуктивным элементом между полюсами

Выражение для комплексного сопротивления двухполюсника $L_1-R_1-C_1$ в операторной форме имеет вид

$$Z(p) = pR_1L_1 / (R_1 + pL_1 + p^2R_1L_1C_1).$$

В схеме с образцовым резистором R_0 (см. рис. 1, а) передаточная функция делителя напряжения $R_0-Z(p)$ определена выражением

$$H(p) = pR_1L_1 / [R_1R_0 + p(R_1 + R_0)L_1 + p^2R_1R_0L_1C_1],$$

H -параметры этой передаточной функции

$$H_0 = 0; H_1 = L_1 / R_0; H_2 = -(R_1 + R_2)L_1^2 / (R_1R_0^2).$$

Параметр H_0 не содержит информацию ни об одном элементе двухполюсника, поэтому для определения трех его электрических параметров в данном примере требуется добавить, еще один — четвертый обобщенный параметр

$$H_3 = \frac{R_1L_1^2}{R_0} \left[\frac{(R_1 + R_0)^2 L_1}{R_1^2 R_0^2} - C_1 \right].$$

При этом необходимо использовать питающие импульсы кубической формы ($n = 3$) и трехкаскадные дифференциаторы. Результаты измерений сигналов $u_{10}, u_{11}, u_{12}, u_{13}$ в первом канале и сигналов $u_{20}, u_{21}, u_{22}, u_{23}$ во втором позволяют вычислить H -параметры в виде

$$\begin{aligned} H_0 &= \frac{u_{23}(t)}{u_{13}(t)}; H_1 = \left[\frac{u_{22}(t)}{u_{12}(t)} - \frac{u_{23}(t)}{u_{13}(t)} \right] t; \\ H_2 &= \left[\frac{u_{21}(t)}{u_{11}(t)} - 2 \frac{u_{22}(t)}{u_{12}(t)} + \frac{u_{23}(t)}{u_{13}(t)} \right] \frac{t^2}{2}; \\ H_3 &= \left[\frac{u_{20}(t)}{u_{10}(t)} - 3 \frac{u_{21}(t)}{u_{11}(t)} + 3 \frac{u_{22}(t)}{u_{12}(t)} - \frac{u_{23}(t)}{u_{13}(t)} \right] \frac{t^3}{6}, \end{aligned}$$

где t — текущее время от начала импульса в момент отсчета всех указанных величин.

Приведенные формулы справедливы для идеальных дифференциаторов с передаточной функцией $K(p) = p\tau$. Реальные дифференциаторы на операционном усилителе (ОУ) склонны к самовозбуждению, особенно в многокаскадном включении. Для устойчивой работы применяют частотную коррекцию. На рис. 2, а, б приведены две схемы скорректированных дифференциаторов с одинаковыми частотными свойствами. В первом из них включен корректирующий резистор с небольшим сопротивлением $R_{кор} = mR$, а в другом — корректирующий конденсатор с небольшой емкостью $C_{кор} = mC$, $m \ll 1$. В обоих случаях передаточная функция одного каскада дифференциатора имеет вид

$$K_1(p) = p\tau / (1 + p\tau),$$

где $\tau = RC$ — постоянная времени и формулы для вычисления H -параметров можно представить как

$$H_0 = \frac{u_{23}}{u_{13}}; H_1 = \left(\frac{u_{22}}{u_{12}} - \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) (t - 2m\tau);$$

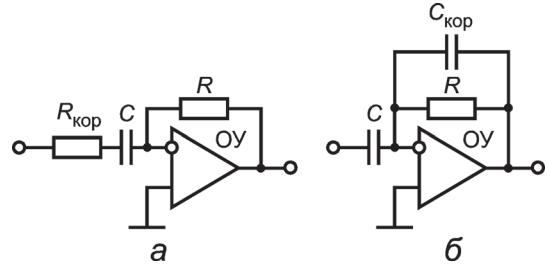


Рис. 2. Схемы дифференцирующих каскадов на операционном усилителе с частотной коррекцией

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

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

Если в качестве образцового использовать индуктивный элемент L_0 (см. рис. 1, б), то передаточная функция делителя $L_0-Z(p)$ примет вид

$$H(p) = R_1L_1 / [R_1(L_1 + L_0) + pL_1L_0 + p^2R_1L_1L_0C_1],$$

H -параметры этой функции

$$H_0 = \frac{L_1}{L_1 + L_0}; H_1 = - \frac{L_1^2 L_0}{R_1(L_1 + L_0)^2};$$

$$H_2 = \frac{L_1^2 L_0}{(L_1 + L_0)^2} \left(\frac{L_1 L_0}{R_1^2(L_1 + L_0)} - C_1 \right).$$

В данном случае для идентификации трехэлементного двухполюсника требуется всего три обобщенных параметра и достаточно использовать питающие импульсы квадратичной формы ($n = 2$) и двухкаскадные дифференциаторы. Результаты измерений сигналов в первом и втором каналах позволяют вычислить H -параметры:

$$H_0 = u_{22} / u_{12}; H_1 = (u_{21} / u_{11} - u_{22} / u_{12})(t - m\tau);$$

$$H_2 = \left(\frac{u_{20}}{u_{10}} - 2 \frac{u_{21}}{u_{11}} + \frac{u_{22}}{u_{12}} \right) \frac{t^2}{2} + \left(\frac{u_{21}}{u_{11}} - \frac{u_{22}}{u_{12}} \right) m\tau t.$$

В другой группе объектов с особыми свойствами двухполюсники имеют бесконечное сопротивление на постоянном токе из-за емкостного элемента в цепи между полюсами. Примеры такого двухполюсника приведены на рис. 3, а, б. Комплексное сопротивление двухполюсника $C_1-R_1-C_2$ в операторной форме

$$Z(p) = [1 + pR_1(C_1 + C_2)] / (pC_1 + p^2R_1C_1C_2).$$

Передаточная функция делителя напряжения $R_0-Z(p)$ в схеме с образцовым резистором (см. рис. 3, а) имеет вид

$$H(p) = \frac{1 + pR_1(C_1 + C_2)}{1 + p[R_0C_1 + R_1(C_1 + C_2)] + p^2R_1R_0C_1C_2},$$

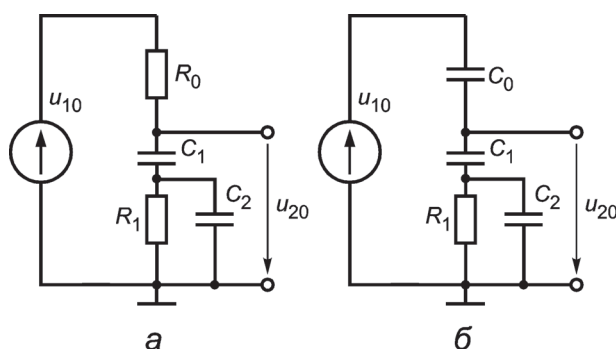


Рис. 3. Измерительные схемы двухполюсника с емкостным элементом между полюсами

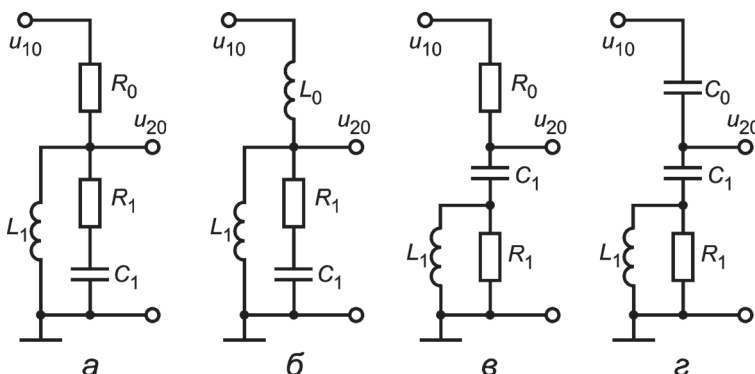


Рис. 4. Измерительные схемы двухполюсников с неинформативными параметрами

обобщенные параметры делителя

$$H_0 = 1; H_1 = -R_0 C_1; H_2 = R_0 C_1^2 (R_0 + R_1);$$

$$H_3 = -R_0 C_1^2 [(R_0 + R_1)^2 C_1 + R_1^2 C_2].$$

В рассматриваемом примере параметр H_0 не содержит информацию об элементах двухполюсника. Следовательно, требуется увеличить показатель степени тестового импульса. Для измерений трех параметров (C_1 , R_1 , C_2) необходимо использовать питающие импульсы кубической формы и трехкаскадный дифференциатор.

Если же в качестве образцового используется емкостный элемент — конденсатор C_0 (см. рис. 3, б), то передаточная функция измерительной цепи выразится как

$$H(p) = \frac{C_0 + p R_1 (C_1 + C_2) C_0}{C_1 + C_0 + p R_1 [(C_1 + C_2) C_0 + C_1 C_2]},$$

обобщенные параметры этой функции

$$H_0 = \frac{C_0}{C_1 + C_0}; H_1 = -\frac{R_1 C_1 C_0^2}{(C_1 + C_0)^2}; H_2 = \frac{R_1^2 C_1 C_0^2}{(C_1 + C_0)^2} \left(\frac{C_1 C_0}{C_1 + C_0} + C_2 \right).$$

Для определения трех параметров достаточно тестового импульса квадратичной формы и двухкаскадных дифференциаторов ($n = 2$).

Таким образом, для сокращения аппаратных затрат целесообразно при измерениях параметров МДП с индуктивным элементом между полюсами использовать образцовую катушку индуктивности, а при измерениях МДП с емкостным элементом — образцовый конденсатор. При применении образцового резистора необходимо предусмотреть повышение показателя степени тестового сигнала и включение дополнительных каскадов в оба дифференциатора. Следует отметить, что в этом случае равенство параметра H_0 нулю или единице служит признаком категории измеряемого МДП.

Еще одним фактором, влияющим на выбор формы питающих импульсов и числа каскадов дифференциаторов, у некоторых МДП служат неинформативные H -параметры, либо равные нулю, либо дублирующие обобщенный параметр с младшим индексом. Примеры таких двухполюсников приведены на рис. 4.

На рис. 4, а, б представлены измерительные схемы для трехэлементного двухполюсника $L_1-R_1-C_1$ с коротким замыканием между полюсами. Комплексное сопротивление двухполюсника в операторном виде выражено формулой

$$Z(p) = (p L_1 + p^2 R_1 L_1 C_1) / (1 + p R_1 C_1 + p^2 L_1 C_1).$$

В схеме на рис. 4, а в качестве образцового элемента использован резистор R_0 . Передаточная функция делителя $R_0-Z(p)$ имеет вид

$$H(p) = \frac{p L_1 + p^2 R_1 L_1 C_1}{R_0 + p (L_1 + R_1 R_0 C_1) + p^2 (R_1 + R_0) L_1 C_1},$$

H -параметры этой передаточной функции

$$H_0 = 0; H_1 = \frac{L_1}{R_0}; H_2 = -\frac{L_1^2}{R_0^2}; H_3 = \frac{L_1^2}{R_0^2} \left(\frac{L_1}{R_0} - R_0 C_1 \right);$$

$$H_4 = (R_1 + R_0) L_1^2 C_1^2 / R_0 - L_1^2 \left(\frac{L_1}{R_0} - R_0 C_1 \right)^2 / R_0^2.$$

Измерительная цепь в схеме рис. 4, а имеет два неинформативных параметра: $H_0 = 0$ и H_2 , дублирующий H_1 . Для идентификации трехэлементного МДП необходимо повысить на две единицы степень тестовых импульсов, т. е. $n = 4$, и добавить по два каскада в оба дифференциатора. При вычислении H -параметров потребуются значения пяти отсчетов сигналов в каждом канале:

$$H_0 = u_{24} / u_{14}; H_1 = (u_{23} / u_{13} - u_{24} / u_{14}) (t - 3m\tau);$$

$$H_2 = \left(\frac{u_{22}}{u_{12}} - 2 \frac{u_{23}}{u_{13}} + \frac{u_{24}}{u_{14}} \right) \left(\frac{t^2}{2} - 2m\tau t + 3m^2\tau^2 \right) + \left(\frac{u_{23}}{u_{13}} - \frac{u_{24}}{u_{14}} \right) m\tau t;$$

$$H_3 = \left(\frac{u_{21}}{u_{11}} - 3 \frac{u_{22}}{u_{12}} + 3 \frac{u_{23}}{u_{13}} - \frac{u_{24}}{u_{14}} \right) \frac{t^3}{6} + \left(\frac{u_{22}}{u_{12}} - 2 \frac{u_{23}}{u_{13}} + \frac{u_{24}}{u_{14}} \right) (m\tau t^2 - m^2\tau^2 t);$$

$$H_4 = \left(\frac{u_{20}}{u_{10}} - 4 \frac{u_{21}}{u_{11}} + 6 \frac{u_{22}}{u_{12}} - 4 \frac{u_{23}}{u_{13}} + \frac{u_{24}}{u_{14}} \right) \frac{t^4}{24} + \left(\frac{u_{21}}{u_{11}} - 3 \frac{u_{22}}{u_{12}} + 3 \frac{u_{23}}{u_{13}} - \frac{u_{24}}{u_{14}} \right) \left(\frac{3m\tau t^3}{2} - m^2\tau^2 t^2 + m^3\tau^3 t \right).$$

В схеме на рис. 4, б в качестве образцового элемента использована катушка индуктивности L_0 . Передаточная функция делителя напряжения $L_0-Z(p)$ определяется выражением

$$H(p) = \frac{L_1 + pR_1L_1C_1}{L_1 + L_0 + p(L_1 + L_0)R_1C_1 + p^2L_1C_1L_0},$$

H -параметры этой передаточной функции

$$H_0 = \frac{L_1}{L_1 + L_0}; H_1 = 0; H_2 = -\frac{L_1^2C_1L_0}{(L_1 + L_0)^2}; H_3 = \frac{R_1L_1^2C_1^2L_0}{(L_1 + L_0)^2}.$$

В этой схеме один неинформативный параметр H_1 равен нулю, поэтому потребуется тестовый импульс кубической формы и трехкаскадные дифференциаторы.

На рис. 4, в, г представлен трехэлементный двухполюсник $C_1-L_1-R_1$ с емкостным элементом между полюсами. Комплексное сопротивление двухполюсника в операторном виде выражено как

$$Z(p) = (R_1 + pL_1 + p^2R_1L_1C_1) / (pR_1C_1 + p^2L_1C_1).$$

Передаточная функция делителя напряжения $R_0-Z(p)$ (см. рис. 4, в) имеет вид

$$H(p) = \frac{R_1 + pL_1 + p^2R_1L_1C_1}{R_1 + p(L_1 + R_1R_0C_1) + p^2(R_1 + R_0)L_1C_1};$$

обобщенные параметры делителя

$$H_0 = 1; H_1 = -R_0C_1; H_2 = R_0^2C_1^2; H_3 = R_0^3C_1^3 - R_0L_1C_1^2;$$

$$H_4 = R_0^4C_1^4 - R_0L_1^2C_1^2/R_1.$$

Измерительная цепь имеет два неинформативных параметра: H_0 и H_2 , дублирующий H_1 . Для определения трех параметров двухполюсника требуется генератор импульсов четвертой степени. Если в качестве образцового использован емкостный элемент—конденсатор C_0 (см. рис. 4, з), то передаточная функция измерительной цепи выражается формулой

$$H(p) = \frac{R_1C_0 + pL_1C_0 + p^2R_1L_1C_1C_0}{R_1(C_1 + C_0) + pL_1(C_1 + C_0) + p^2R_1L_1C_1C_0},$$

ее обобщенные параметры

$$H_0 = \frac{C_0}{C_1 + C_0}; H_1 = 0; H_2 = \frac{L_1C_1^2C_0}{(C_1 + C_0)^2}; H_3 = -\frac{L_1^2C_1^2C_0}{R_1(C_1 + C_0)^2}.$$

Для определения трех параметров достаточно тестового импульса кубической формы и трехкаскадных дифференциаторов ($n = 3$).

Таким образом, при выборе измерительной схемы для определения обобщенных параметров многоэлементных двухполюсников следует учитывать зависимость требуемого показателя степени тестового сигнала и количества каскадов в дифференциаторах от конфигурации схемы замещения объекта измерения и типа образцового элемента. Схему с образцовым резистором, обладающую универсальными свойствами, можно использовать для измерений параметров двухполюсников с конечным, нулевым и бесконечным сопротивлением между полюсами на постоянном токе. Однако для этого необходимо обеспечить достаточный запас ресурсов — показатель степени тестовых импульсов, количество каскадов в каждом канале дифференцирования, число измеряемых величин и соответствующее оборудование для вычисления обобщенных и электрических параметров элементов двухполюсника.

Моделирование схем преобразователей обобщенных параметров при помощи программы MultiSim подтвердило теоретические результаты настоящей работы. Для возбуждения измерительной цепи был применен синтезатор, аналогичный прецизионному многофункциональному генератору сигналов фирмы АКИП (Россия) модели АКИП-3403 (2 М).

Литература

1. **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. V. 55. N. 9. P. 1071—1076.
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.
3. **Пат. № 2422838 РФ.** Способ и устройство измерения параметров многоэлементных двухполюсников / В. И. Иванов, В. С. Титов, А. С. Петров // Изобретения. Полезные модели. 2011. № 18.

Дата принятия 30.12.2013 г.