

## ИЗМЕРИТЕЛЬ Z-ПАРАМЕТРОВ ПАССИВНЫХ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ДВУХПОЛЮСНИКОВ

А. В. БАЛАШОВ, С. Н. ГВОЗДЕВА

*Юго-Западный государственный университет, 305040, Курск, Россия  
E-mail: alex\_fifa@mail.ru*

Представлены результаты исследования алгоритма и устройства измерения обобщенных Z-параметров пассивных многоэлементных двухполюсников, схема замещения которых содержит емкостный элемент в разрыве цепи между полюсами. Усовершенствована схема преобразователя степенного импульса напряжения в степенной импульс тока для возбуждения измеряемого многоэлементного двухполюсника. Дополнительно введенный в устройство аналоговый ключ обеспечивает нулевые начальные условия, разряжая емкостные элементы двухполюсника объекта измерения в промежутке между тестовыми импульсами тока.

**Ключевые слова:** многоэлементный двухполюсник, степенной импульс, обобщенные параметры, преобразователь

**Введение.** Пассивные датчики имеют, как правило, сложные многоэлементные двухполюсные схемы замещения. В информационно-измерительных системах широко применяются емкостные датчики. Схема замещения такого датчика представляет собой пассивный *RLC*-двухполюсник, содержащий емкостной элемент, который на постоянном токе создает разрыв цепи между полюсами. В последние годы активно разрабатываются способы и алгоритмы идентификации датчиков на основе метода обобщенных параметров комплексного сопротивления (комплексной проводимости) объекта измерения. Ряд публикаций посвящен развитию теории метода и способов преобразования параметров многоэлементных двухполюсников (МДП) [1—6]. Для реализации метода обобщенных параметров можно использовать следующие варианты измерительной цепи (ИЦ):

- 1) мостовую цепь, в одно плечо которой включают МДП, а для питания моста используют импульс напряжения, изменяющегося по закону  $n$ -й степени;
- 2) с возбуждением МДП импульсом напряжения степенной формы, при этом реакция ИЦ представляет собой сигнал, состоящий из импульсов тока степенной формы;
- 3) с возбуждением МДП импульсом тока степенной формы, при этом реакция ИЦ представляет собой сигнал, состоящий из импульсов напряжения степенной формы.

Для пассивного двухполюсника, имеющего конечное (не нулевое и не бесконечное) сопротивление между полюсами на постоянном токе, операторное выражение системной функции  $F(p)$  — комплексного сопротивления или комплексной проводимости — имеет вид

$$F(p) = \frac{b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + \dots}{a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots}, \quad (1)$$

при этом  $a_0$  и  $b_0$  не равны нулю [7].

При возбуждении МДП тестовым импульсом тока (или напряжения), имеющего форму функции  $n$ -й степени  $x(t) = X_{\text{т}} t^n / t_{\text{и}}^n$ , в ИЦ возникает импульс напряжения (или тока), в котором присутствуют составляющие  $n$ -й,  $(n-1)$ -й, ..., первой и нулевой степеней [1]:

$$v_{\text{МДП}}(t) = \frac{F_0 X_{\text{T}} t^n}{t_{\text{и}}^n} + \frac{n F_1 X_{\text{T}} t^{n-1}}{t_{\text{и}}^n} + \frac{n(n-1) F_2 X_{\text{T}} t^{n-2}}{t_{\text{и}}^n} + \dots + \frac{n! F_n X_{\text{T}}}{t_{\text{и}}^n}; \quad (2)$$

$F_0, F_1, F_2, \dots, F_n$  — обобщенные параметры двухполюсника. Их можно определить, используя рекуррентные выражения

$$F_0 = \frac{b_0}{a_0}; F_1 = \frac{b_1 - a_1 F_0}{a_0}; F_2 = \frac{b_2 - a_2 F_0 - a_1 F_1}{a_0}; F_3 = \frac{b_3 - a_3 F_0 - a_2 F_1 - a_1 F_2}{a_0}; \dots \quad (3)$$

Если в схеме замещения МДП между полюсами включен емкостной элемент, в числителе функции проводимости  $Y(p)$  отсутствует свободный член  $b_0$  либо свободный член  $a_0$  — в знаменателе функции сопротивления  $Z(p)$ . В этом случае аппаратные затраты и сложность схемы ИЦ определяются видом тестового сигнала. Так, при использовании мостовой схемы параметр  $H_0$  ветви, в которую включен МДП, тождественно равен единице и, следовательно, не содержит информации об объекте [7]. При использовании тестового сигнала в виде импульса напряжения параметр проводимости  $Y_0$  тождественно равен нулю, поэтому не является информативным. Таким образом, в обоих случаях требуется повышать показатель степени тестового сигнала. В статье [8] показано, что для возбуждения МДП с емкостным элементом в разрыве цепи постоянного тока преимущество следует отдать тестовому сигналу в форме степенных импульсов тока. При этом в результате преобразования параметров МДП определяются  $Z$ -параметры датчика. Показатель степени тестового импульса можно снизить по сравнению с количеством измеряемых параметров МДП на две единицы. Примером преобразователя  $Z$ -параметров емкостного датчика является измеритель параметров пассивных многоэлементных двухполюсников [9, 10]. Цель настоящей работы заключается в усовершенствовании схемы указанного преобразователя [9].

**Измерение  $Z$ -параметров емкостного пассивного датчика с возбуждением импульсом тока.** На рис. 1 приведен пример четырехэлементного МДП с емкостным элементом  $C_1$  в разрыве цепи между полюсами. Операторное выражение для комплексного сопротивления

двухполюсника имеет вид

$$Z(p) = \frac{R_2 + p(R_1 R_2 C_1 + L_1) + p^2(R_1 + R_2)L_1 C_1}{p R_2 C_1 + p^2 L_1 C_1}. \quad (4)$$

Так как в знаменателе (4) отсутствует свободный член  $a_0$ , формулы (3) для определения обобщенных параметров непригодны. Воспользуемся предложенной в работах [3, 11] модифицированной формой выражения системной функции МДП

$$\tilde{Z}(p) = \frac{R_2 + p(R_1 R_2 C_1 + L_1) + p^2(R_1 + R_2)L_1 C_1}{R_2 C_1 + p L_1 C_1}. \quad (5)$$

Обобщенные  $Z$ -параметры модифицированной функции сопротивления МДП имеют вид [12]:

$$\tilde{Z}_{-1} = \frac{1}{C_1}; \tilde{Z}_0 = R_1; \tilde{Z}_1 = L_1; \tilde{Z}_2 = -L_1^2/R_2.$$

Так как оператор  $1/p$  отвечает интегрированию, старшая степень составляющей импульса напряжения на двухполюснике будет на единицу выше степени импульса тока. Например, для возбуждения четырехэлементного МДП достаточно импульса тока квадратичной формы  $i_{\text{МДП}}(t) = I_{\text{T}} t^2 / t_{\text{и}}^2$ .

Импульс напряжения на двухполюснике содержит кубическую, квадратичную, линейную и постоянную составляющие:

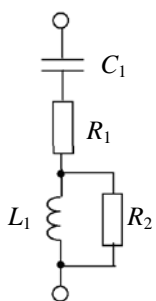


Рис. 1

$$u_{\text{МДП}}(t) = \frac{Z_{-1}I_T t^3}{3t_{\text{и}}^2} + \frac{Z_0 I_T t^2}{t_{\text{и}}^2} + \frac{2Z_1 I_T t}{t_{\text{и}}^2} + \frac{2Z_2 I_T}{t_{\text{и}}^2}. \quad (6)$$

В измерителе Z-параметров формирователь квадратичного импульса тока выполнен как преобразователь „напряжение—ток“ (ПНТ) на операционном усилителе (ОУ) с параллельной отрицательной обратной связью (ООС) по напряжению и последовательной ООС — по току. На вход преобразователя поступают квадратичные импульсы напряжения. В качестве достоинства такого ПНТ следует отметить возможность „заземлять“ двухполюсник объекта измерения, а к недостаткам — присутствие на входе ОУ синфазного напряжения, которое приводит к искажению формы тока, и отсутствие цепи разряда емкостных элементов МДП в паузе между тестовыми импульсами, что приводит к накоплению погрешности от остаточных зарядов емкостных элементов [13—15].

На рис. 2 приведена схема измерителя параметров четырехэлементных двухполюсников. Предлагаемое устройство содержит генератор прямоугольных импульсов напряжения (ГПИ), три последовательно включенных интегратора, на выходах которых формируются импульсы линейно изменяющегося (инт1), квадратичного (инт2) и кубического (инт3) напряжения и ПНТ, в котором совмещены функции формирования импульса тока в МДП и преобразования этого тока в импульс напряжения на МДП.

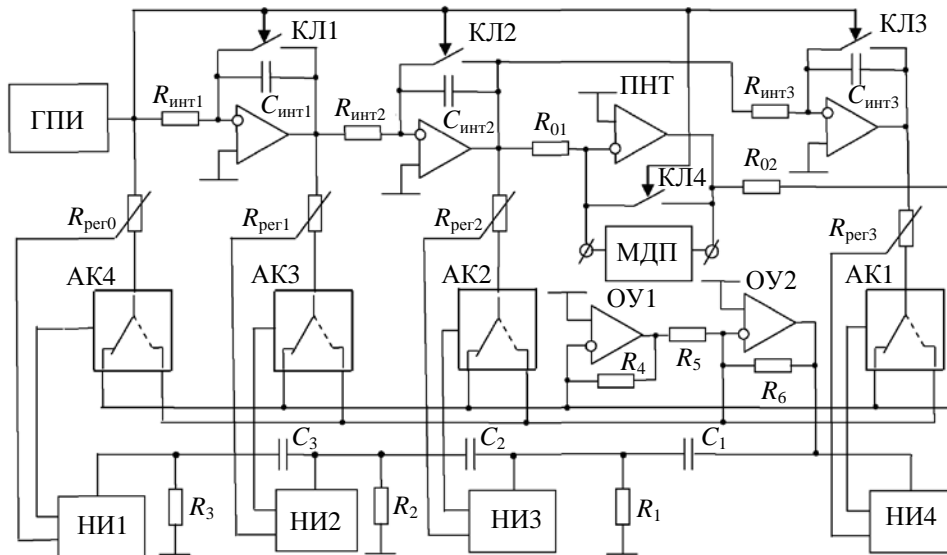


Рис. 2

В состав каждого интегратора входят операционный усилитель, резистор  $R_{\text{инт}}$ , конденсатор  $C_{\text{инт}}$  и аналоговый ключ (Кл). Амплитудные значения этих импульсов соответственно равны

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

где  $U_0$  — амплитуда прямоугольного импульса;  $t_{\text{и}}$  — длительность импульса;  $T_1 = R_{\text{инт1}} C_{\text{инт1}}$ ,  $T_2 = R_{\text{инт2}} C_{\text{инт2}}$ ,  $T_3 = R_{\text{инт3}} C_{\text{инт3}}$  — постоянные времени первого, второго и третьего интеграторов соответственно.

Для возбуждения четырехэлементного двухполюсника, в схеме замещения которого имеется емкостной элемент, создающий на постоянном токе обрыв цепи между полюсами, используется ток квадратичной формы, который вырабатывается из импульса выходного напряжения второго интегратора. Амплитуда тока равна  $I_T = U_2 / R_{01} = U_0 t_{\text{и}}^2 / 2T_1 T_2 R_{01}$ , где  $R_{01}$  — сопротивление первого образцового резистора.

Для определения Z-параметров необходимо уравновесить все составляющие сигналы напряжения на двухполюснике (6) компенсирующими сигналами, сформированными из

выходных напряжений третьего, второго и первого интеграторов, а также генератора прямоугольных импульсов. Регулируемые резисторы  $R_{\text{per}3}$ ,  $R_{\text{per}2}$ ,  $R_{\text{per}1}$ ,  $R_{\text{per}0}$  предназначены для уравнивания кубичной, квадратичной, линейной и постоянной составляющих компенсационного тока соответственно. Аналоговые коммутаторы АК1, АК2, АК3 и АК4 позволяют выбирать направление подключения компенсирующих токов к первому или второму входу дифференциального формирователя напряжения неравновесия, выполненного на операционных усилителях ОУ1 и ОУ2 и резисторах  $R_4$ ,  $R_5$  и  $R_6$ , в зависимости от знака соответствующего Z-параметра. К выходу формирователя напряжения неравновесия подключен вход первого звена трехкаскадного дифференциатора, выполненного на последовательно включенных дифференцирующих RC-цепях:  $R_1C_1$ ,  $R_2C_2$  и  $R_3C_3$ . Трехкратное дифференцирование сигнала МДП, содержащего кубичную, квадратичную, линейную и постоянную составляющие, позволяет избирательно настроить компенсирующие импульсы напряжения, уравнивающие сигналы объекта измерения.

Уравнивание следует начинать с сигнала старшей — третьей — степени. Кубическую составляющую напряжения (6) на двухполюснике, имеющую амплитуду  $U_{\text{МДП}3}$ , уравнивают напряжением кубической формы с выхода третьего интегратора  $U_3$ :

$$U_{\text{МДП}3} = \frac{Z_{-1}U_0t_{\text{и}}^3}{6T_1T_2R_{01}}, \quad U_3 = \frac{U_0t_{\text{и}}^3}{6T_1T_2T_3}.$$

Условие баланса имеет вид

$$U_{\text{МДП}3}/R_{02} = U_3/R_{\text{per}3},$$

где  $R_{02}$  — сопротивление второго образцового резистора. Отсюда можно определить значение  $Z_{-1}$ :

$$Z_{-1} = \frac{R_{01}R_{02}}{T_3R_{\text{per}3}}. \quad (7)$$

Квадратичную составляющую напряжения (6) на двухполюснике, имеющую амплитуду  $U_{\text{МДП}2}$ , уравнивают напряжением с выхода второго интегратора  $U_2$ :

$$U_{\text{МДП}2} = \frac{Z_0U_0t_{\text{и}}^2}{2T_1T_2R_{01}}, \quad U_2 = \frac{U_0t_{\text{и}}^2}{2T_1T_2}.$$

Условие баланса имеет вид

$$U_{\text{МДП}2}/R_{02} = U_2/R_{\text{per}2}.$$

Отсюда можно определить параметр  $Z_0$ :

$$Z_0 = \frac{R_{01}R_{02}}{R_{\text{per}2}}. \quad (8)$$

Линейную составляющую напряжения на двухполюснике  $U_{\text{МДП}1}$  компенсируют выходным напряжением первого интегратора с амплитудой  $U_1$

$$U_{\text{МДП}1} = \frac{Z_1U_0t_{\text{и}}}{T_1T_2R_{01}}, \quad U_1 = \frac{U_0t_{\text{и}}}{T_1}.$$

Условие баланса  $U_{\text{МДП}1}/R_{02} = U_1/R_{\text{per}1}$  представляет собой равенство  $Z_1/T_1T_2R_{01}R_{02} = 1/T_1R_{\text{per}1}$ , из которого можно определить параметр  $Z_1$ :

$$Z_1 = \frac{R_{01}R_{02}T_2}{R_{\text{per}1}}. \quad (9)$$

На четвертом этапе уравнивают постоянную составляющую напряжения на двухполюснике  $U_{\text{МДП}0} = Z_2U_0/T_1T_2R_{01}$  выходным напряжением  $U_0$  генератора прямоугольных

импульсов. Условие баланса имеет вид  $U_{\text{МДП}0}/R_{02} = U_0/R_{\text{рег}0}$  и позволяет найти параметр  $Z_2$ :

$$Z_2 = \frac{R_{01}R_{02}T_1T_2}{R_{\text{рег}0}}. \quad (10)$$

Дополнительно введенный в устройство аналоговый ключ Кл4 разряжает в паузе между тестовыми импульсами тока емкостные элементы двухполюсника объекта измерения, обеспечивая нулевые начальные условия.

Определив Z-параметры МДП, вычисляют электрические параметры его элементов:

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

Проведено моделирование алгоритма идентификации двухполюсника с параметрами элементов:  $C_1 = 5$  нФ;  $R_1 = 1$  кОм;  $L_1 = 8$  мГн;  $R_2 = 4$  кОм, при этом:  $Z_{-1} = 0,2$  кОм/мкс;  $Z_0 = 1$  кОм;  $Z_1 = 8$  кОм·мкс;  $Z_2 = -16$  кОм·мкс<sup>2</sup>. Выбраны следующие параметры измерителя: длительность тестового импульса  $t_{\text{и}} = 240$  мкс, постоянные интеграторов  $T_1 = 60$  мкс,  $T_2 = 24$  мкс,  $T_3 = 16$  мкс, амплитуда прямоугольного импульса  $U_0 = 0,1$  В. Тогда амплитуды импульсов на выходах интеграторов равны  $U_1 = 0,4$ ;  $U_2 = 2$ ;  $U_3 = 10$  В. Установлены сопротивления образцовых резисторов  $R_{01} = 2$ ,  $R_{02} = 5$  кОм.

При этих установках получены следующие показатели режима измерителя: амплитуда импульса тока двухполюсника  $I_{\text{т}} = U_2/R_{01} = 1$  мА; амплитуды импульсов напряжений на двухполюснике  $U_{\text{МДП}3} = Z_{-1}I_{\text{т}}t_{\text{и}}/3 = 16$  В;  $U_{\text{МДП}2} = Z_0I_{\text{т}} = 1$  В;  $U_{\text{МДП}1} = 2Z_1I_{\text{т}}/t_{\text{и}} = 0,066(6)$  В;  $U_{\text{МДП}0} = 2Z_2I_{\text{т}}/t_{\text{и}}^2 = 0,005(5)$  В. Компенсация составляющих импульса напряжения на двухполюснике достигается при:  $R_{\text{рег}3} = 3,125$ ;  $R_{\text{рег}2} = 10$ ;  $R_{\text{рег}1} = 30$ ;  $R_{\text{рег}0} = 900$  кОм.

Подстановка значений сопротивлений регулируемых резисторов в формулы (7)—(10) подтверждает справедливость полученных аналитических выражений.

**Заключение.** Рассмотрены особенности преобразования обобщенных параметров пассивных датчиков с емкостным элементом в разрыве цепи постоянного тока между полюсами МДП. Предложены алгоритм параметрической идентификации многоэлементных емкостных датчиков и устройство для его реализации. Режим виртуального нуля на входах дифференциального формирователя сигнала неравновесия позволяет устранить влияние синфазного сигнала в нуль-индикаторах на балансирование напряжения на двухполюснике и компенсирующих сигналов.

#### 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., Голубов Д. А. Преобразователь параметров многоэлементных двухполюсников с уравниванием токов // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 2. С. 73—78.
3. Иванов В. И., Клюев А. Л. Определение параметров пассивных двухполюсников с разрывом цепи на постоянном токе // Изв. ЮЗГУ. Сер. „Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение“. 2012. № 2, ч. 1. С. 142—147.
4. Иванов В. И., Клюев А. Л. Идентификация пассивных двухполюсников с коротким замыканием между полюсами на постоянном токе // Изв. ЮЗГУ. Сер. „Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение“. 2012. № 2, ч. 2. С. 24—28.
5. Иванов В. И., Балашов А. В. Обобщенные параметры частотно-независимых двухполюсников // Изв. ЮЗГУ. Сер. „Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение“. 2012. № 2, ч. 3. С. 79—84.

6. 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.
7. Иванов В. И. Теория и применение обобщенных параметров RLC-двухполюсников. Курск: ЮЗГУ, 2013. 136 с.
8. Иванов В. И., Титов В. С. Преобразование параметров многоэлементных RLC-двухполюсников с коротким замыканием и разрывом цепи между полюсами на постоянном токе // Датчики и системы. 2014. № 9. С. 26—32.
9. Патент РФ № 2575765, G01R 14/00. Измеритель параметров многоэлементных пассивных двухполюсников / В. И. Иванов, В. С. Титов, С. Н. Гвоздева. Опубл. 20.02.2016. Бюл. № 5.
10. Патент РФ № 2390787, G01R 27/02. Измеритель параметров многоэлементных пассивных двухполюсников / В. И. Иванов, В. С. Титов, Д. А. Голубов. Опубл. 27.05.2010. Бюл. № 15.
11. Иванов В. И., Титов В. С. Модели алгоритмов и устройств параметрической идентификации многоэлементных RLC-датчиков на основе обобщенных параметров двухполюсников. Ч. 1 // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. № 2. С. 128—135.
12. Иванов В. И. Модели алгоритмов и устройств параметрической идентификации многоэлементных RLC-датчиков на основе обобщенных параметров двухполюсников. Ч. 2 // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. № 2. С. 136—142.
13. Петров А. С., Голубов Д. А., Иванов В. И. Применение преобразователя „напряжение—ток“ в измерителе параметров многоэлементных двухполюсников // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации: Сб. матер. IX междунар. конф. Курск: ЮЗГУ, 2010. С. 102—104.
14. Иванов В. И., Титов В. С., Петров А. С. Измерительный преобразователь параметров многоэлементных двухполюсников с дифференцированием сигналов // Измерительная техника. 2012. № 9. С. 51—54.
15. Петров А. С., Титов В. С., Иванов В. И. Измерительный преобразователь параметров многоэлементных двухполюсников с дифференцированием сигналов на RC-звеньях // Изв. ЮЗГУ. Сер. „Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение“. 2012. № 2. С. 73—78.

#### Сведения об авторах

- Алексей Вячеславович Балашов** — аспирант; Юго-Западный государственный университет, кафедра вычислительной техники; E-mail: alex\_fifa@mail.ru
- Светлана Николаевна Гвоздева** — студентка; Юго-Западный государственный университет, кафедра вычислительной техники; E-mail: svetka-gvozdeva@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
вычислительной техники

Поступила в редакцию  
02.04.16 г.

**Ссылка для цитирования:** Балашов А. В., Гвоздева С. Н. Измеритель Z-параметров пассивных многоэлементных двухполюсников // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 7. С. 605—611.

#### AN INSTRUMENT FOR MEASURING Z-PARAMETERS OF PASSIVE MULTI-ELEMENT TWO-PORT NETWORKS

A. V. Balashov, S. N. Gvozdeva

Southwest State University, 305040, Kursk, Russia  
E-mail: alex\_fifa@mail.ru

An algorithm and a device for measurement of the generalized Z-parameters of multi-element passive two-port circuit containing a capacitive element in the circuit between the poles are studied. Electrical diagram of converter of exponential voltage pulse in exponential current pulse used for excitation of the multi-element two-port network is improved. An analog switch additionally introduced into the device provides a zero initial condition by discharging the capacitive elements of the object under measurement in the interval between sounding current pulses.

**Keywords:** multi-element two-port network, exponential pulse, generalized parameters, converter

**Data on authors**

- Alexey V. Balashov** — Post-Graduate Student; Southwest State University, Department of Computer Science; E-mail: alex\_fifa@mail.ru
- Svetlana N. Gvozdeva** — Student; Southwest State University, Department of Computer Science; E-mail: svetka-gvozdeva@yandex.ru

**For citation:** Balashov A. V., Gvozdeva S. N. An instrument for measuring Z-parameters of passive multi-element two-port networks // Izv. vuzov. Priborostroenie. 2016. Vol. 59, N 7. P. 605—611 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-7-605-611