#### УДК 621.317.33

# АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ РАЗДЕЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЕМКОСТНОГО ДАТЧИКА ИЗ-ЗА НЕИДЕАЛЬНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ

#### Т.С. Евстифеева, К.Д. Левина

Самарский государственный технический университет Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: gostar\_tat@mail.ru, ksenialevina@mail.ru

Рассматривается новый метод измерения параметров емкостных датчиков – по мгновенным значениям переходных процессов на участках измерительной цепи, содержащей два образцовых элемента. В отличие от известных методов, основанных на определении емкости по отдельным мгновенным значениям переходных процессов, реализация метода обеспечивает раздельное определение как емкости, так и сопротивления изоляции емкостного датчика, что обеспечивает повышение точности измерения информативного параметра. Предлагается структурная схема информационно-измерительной системы, реализующей метод. Приводятся результаты анализа погрешности, обусловленной отклонением реального переходного процесса от заложенного в модели. По полученным результатам можно осуществлять оптимальный выбор элементов измерительной цепи в соответствии с требованиями по точности и времени измерения.

**Ключевые слова:** емкостной датчик, переходный процесс, мгновенные значения, сопротивление изоляции, модель, погрешность.

В настоящее время широкое распространение получили методы определения параметров емкостных датчиков (ЕД) по мгновенным значениям переходного процесса в измерительной цепи (ИЦ). При реализации данных методов время измерения не зависит от постоянной времени ИЦ т [1].

Точность измерения параметров датчиков во многом зависит от учета их многоэлементной схемы замещения [2]. При этом значение методической погрешности во многом определяется такими неинформативными параметрами, как сопротивление конденсатора постоянному току, которое обуславливает ток утечки, и сопротивление соединительных проводников, подключающих датчик к ИЦ [3].

В [4] авторами предложен метод, который обеспечивает раздельное определение емкости и сопротивления изоляции емкостного датчика, что обеспечивает повышение точности измерения информативного параметра.

Метод основан на том, что на ИЦ, состоящую из последовательно включенных двух образцовых резисторов  $R_0$  и емкостного датчика, имеющего емкость  $C_X$  и сопротивление изоляции  $R_X$ , подают напряжение постоянного тока  $U_0$ ; в произвольный момент времени  $t_1$  одновременно измеряют мгновенные значения переходных процессов на участке цепи, содержащем второй образцовый резистор и ЕД, и датчике относительно общего вывода ИЦ; через образцовый интер-

Татьяна Сергеевна Евстифеева, аспирант. Ксения Дмитриевна Левина, аспирант.

вал времени  $\Delta t$  измеряют мгновенное значение напряжения на ЕД; через такой же интервал времени  $\Delta t$  снова измеряют мгновенное значение напряжения на ЕД и определяют неизвестную емкость и сопротивление изоляции по измеренным значениям.

Большим достоинством рассматриваемого метода является возможность начала измерительного процесса независимо от момента подключения источника напряжения к измерительной цепи, что расширяет функциональные возможности.

Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рис. 1.



Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

При подключении напряжения  $U_0$  к измерительной цепи переходные процессы на участке цепи, содержащем второй образцовый резистор и емкостной датчик, и на датчике относительно общего вывода ИЦ описываются выражениями

$$u_1(t) = \frac{U_0}{2} \left\{ 1 + \frac{R_X}{2R_0 + R_X} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \right\}; \ u_2(t) = \frac{U_0 R_X}{2(2R_0 + R_X)} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right];$$

где  $\tau = \frac{2C_X R_0 R_X}{2R_0 + R_X}$  – постоянная времени ИЦ.

Мгновенные значения напряжений в моменты времени  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$  равны

$$U_{11} = \frac{U_0}{2} \left\{ 1 + \frac{R_X}{2R_0 + R_X} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau}\right) \right] \right\}; \ U_{21} = \frac{U_0 R_X}{2(2R_0 + R_X)} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau}\right) \right];$$
$$U_{22} = \frac{U_0 R_X}{2(2R_0 + R_X)} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t_1 + \Delta t}{\tau}\right) \right]; \ U_{23} = \frac{U_0 R_X}{2(2R_0 + R_X)} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t_1 + 2\Delta t}{\tau}\right) \right].$$

После преобразований мгновенных значений напряжений неизвестные сопротивление изоляции и емкость датчика принимают вид

$$R_{X} = \frac{2R_{0} \left(2U_{22}^{2} - U_{21}U_{23}\right)}{\left(U_{11} - U_{21}\right)\left(2U_{22} - U_{21} - U_{23}\right) - \left(2U_{22}^{2} - U_{21}U_{23}\right)};$$
(1)

$$C_X = -\frac{(2R_0 + R_X)\Delta t}{2R_0R_X \ln\left(\frac{U_{23} - U_{22}}{U_{22} - U_{21}}\right)}.$$
(2)

54

При определении емкости датчика в соответствии с (2) используется значение сопротивления  $R_X$ , полученное согласно выражению (1). Это обеспечивает увеличение точности измерения  $C_X$ .

В схеме замещения ИЦ не было учтено конечное значение сопротивления соединительного проводника  $R_1$ , подключающего один из выводов ЕД ко второму образцовому сопротивлению  $R_0$ . Наличие данного сопротивления приводит к отклонению используемой модели от реального переходного процесса.

На рис. 2 представлена схема информационно-измерительной системы (ИИС), реализующей метод, в измерительной цепи которой учтено сопротивление  $R_1$ .



Рис. 2. Схема ИИС, реализующей метод

В состав ИИС входят: источник опорного напряжения постоянного тока ИН, аналоговый ключ КЛ, измерительная цепь ИЦ, два аналого-цифровых преобразователя АЦП1 и АЦП2 и контроллер КНТ с шинами управления ШУ и данных ШД.

Если учитывать конечное значение сопротивления  $R_1$ , то постоянная времени реальной ИЦ примет вид

$$\tau_p = \frac{C_X R_X (2R_0 + R_1)}{R_X R_1 (2R_0 + R_1 + R_X)}$$

Произведем анализ погрешности определения информативного параметра ЕД, используя предложенный в [5] подход к оценке погрешности вычисления значения функции, аргументы которой заданы приближенно, с помощью дифференциала этой функции, считая, что абсолютные погрешности аргументов соответствуют наибольшему отклонению параметров модели от реального переходного процесса  $\Delta U_{\text{max}}$ .

При этом абсолютная погрешность измерения емкости равна

$$\Delta C_X = \left[ \left| \frac{\partial C_X}{\partial U_{21}} \right| + \left| \frac{\partial C_X}{\partial U_{22}} \right| + \left| \frac{\partial C_X}{\partial U_{23}} \right| \right] \Delta U_{\max}$$
(3)

В общем случае можно считать, что предельное значение

$$\Delta U_{\max} = \sup\left[\frac{U_0 R_X}{2R_0 + R_X} \left| \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right| \right]$$
(4)

может быть вычислено путем решения уравнения  $\left[\exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right] = 0$ .

Тогда, используя выражения (2) – (4), можно определить предельную относительную погрешность измерения емкости датчика:

$$\delta_{C} = \frac{2\tau \left[1 + \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right)\right] \left[\exp\left[-\ln\left(\frac{\tau_{p}}{\tau}\right)\left(\frac{\tau_{p}}{\tau_{p} - \tau}\right)\right] - \exp\left[-\ln\left(\frac{\tau_{p}}{\tau}\right)\left(\frac{\tau}{\tau_{p} - \tau}\right)\right]}{\Delta t \exp\left(-\frac{t_{1}}{\tau}\right) \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right)\left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right)\right]}.$$
(5)

На рис. 3 и 4 представлены графики зависимости погрешности  $\delta_C$  от отношения образцового интервала времени  $\Delta t$  к постоянной времени ИЦ т и отношения интервала времени между подачей напряжения на ИЦ и моментом начала измерения к т при  $\frac{R_X}{R_0} = 500$  и  $\frac{R_X}{R_0} = 10$  соответственно для  $\frac{R_1}{R_0} = 0,001$  согласно выражению (5).



Рис. 3. График зависимости погрешности определения

емкости от 
$$\frac{\Delta t}{\tau}$$
 и  $\frac{t_1}{\tau}$  при  $\frac{R_X}{R_0} = 500$  и  $\frac{R_1}{R_0} = 0,001$ 

Анализ показывает, что погрешность измерения емкости датчика существенно зависит от соотношений  $\frac{\Delta t}{\tau}$  и  $\frac{t_1}{\tau}$ . Причем с уменьшением отношения интервала времени между подачей напряжения на ИЦ и моментом начала измерения к постоянной времени ИЦ погрешность снижается.

Кроме того, точность измерения во многом определяется соотношением между значениями сопротивления соединительного проводника  $R_1$  и сопротивления ления образцового резистора  $R_0$ . При уменьшении отношения  $\frac{R_1}{R_0}$  в 10 раз погрешность сокращается практически на порядок.



Рис. 4. График зависимости погрешности определения

емкости от 
$$\frac{\Delta t}{\tau}$$
 и  $\frac{t_1}{\tau}$  при  $\frac{R_X}{R_0} = 10$  и  $\frac{R_1}{R_0} = 0,001$ 

Из рис. 3 и 4 следует, что соотношение между сопротивлением изоляции и образцовым резистором оказывает слабое влияние на точность определения емкости ЕД.

По полученным результатам можно осуществлять оптимальный выбор элементов измерительной цепи в соответствии с требованиями по точности и времени измерения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. *Мелентьев В.С.* Аппроксимационные методы измерения параметров линейных электрических цепей // Измерительная техника. 2010. № 10. С. 57-59.
- 2. *Мелентьев В.С., Батищев В.И., Смолина А.М., Евстифеева Т.С.* Повышение точности измерения параметров емкостных датчиков перемещения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 6. С. 36-38.

- 3. *Мелентьев В.С.* Методы повышения точности измерения параметров емкостных датчиков // Измерительная техника. 2014.
- 4. Мелентьев В.С., Латухова О.А., Евстифеева Т.С. Метод раздельного определения параметров емкостных датчиков по мгновенным значениям переходных процессов // Ползуновский вестник. 2013. № 2. С. 106-108.
- 5. *Мелентьев В.С., Батищев В.И.* Аппроксимационные методы и средства измерения и контроля параметров двухполюсных электрических цепей. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 200 с.

Статья поступила в редакцию 5 сентября 2014 г.

## THE ANALYSIS OF ERRORS OF THE SEPARATE DETERMINATION OF THE CAPACITIVE SENSOR PARAMETERS DUE TO THE MEASUR-ING CHAIN NONIDEALITY

### T.S. Evstifeeva, K.D. Levina

Samara State Technical University 244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

This paper deals with a new method of measuring the capacitive sensors parameters on the instantaneous values of transient processes on the sections of the measuring circuit that contain two exemplary elements. Unlike the known methods based on the capacity determination on individual instantaneous values of transient processes, the implementation of the method provides separate definition of both capacity and insulation resistance of capacitive sensor; this improves measurement accuracy of informative parameter. Typical block diagram of the information-measuring system that implements the method is given. The paper shoes the results of the analysis of errors that occur due to deviation of the actual transition process from the one put into the model. The optimal choice of the measuring circuit items in accordance with the requirements of accuracy and measurement time can be made according to the results obtained.

*Keywords:* capacitive sensor, transient, instantaneous value, insulation resistance, model, an error.

Tatyana S. Evstifeeva, Postgraduate Student. Ksenia D. Levina, Postgraduate Student.