

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 621.317.33

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА РАЗДЕЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЕМКОСТНОГО ДАТЧИКА ПОЛОЖЕНИЯ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИЗ-ЗА НЕИДЕАЛЬНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ*

В.С. Мелентьев, К.Д. Левина, Е.А. Сусова

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

E-mail: vs_mel@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 данного метода обеспечивает отдельное определение как емкости, так и сопротивления изоляции емкостного датчика и сопротивления соединительного проводника, подключающего датчик к измерительной цепи. Это обеспечивает повышение точности измерения информативного параметра. Предлагается структурная схема измерительного средства, реализующего метод. Приводятся результаты анализа влияния квантования мгновенных значений переходных процессов на погрешность определения емкости. По полученным результатам можно осуществлять оптимальный выбор блоков в соответствии с требованиями по точности измерения.

Ключевые слова: емкостной датчик, переходный процесс, мгновенные значения, сопротивление изоляции, сопротивление соединительных проводников, погрешность.

Определение параметров емкостных датчиков положения и перемещения (ЕДПП) по отдельным мгновенным значениям переходного процесса в измерительной цепи, в состав которой входит датчик (ИЦД), при подключении к ней напряжения постоянного тока имеет целый ряд преимуществ по сравнению с методами определения параметров с преобразованием во временной интервал с последующим его измерением [1]. Во-первых, в таких методах время измерения не

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 13-08-00173-а).

Владимир Сергеевич Мелентьев (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Информационно-измерительная техника».

Ксения Дмитриевна Левина, аспирант.

Екатерина Александровна Сусова, аспирант.

зависит от постоянной времени ИЦД τ , и, следовательно, определяется только временем измерения мгновенных значений переходного процесса и реализации алгоритма обработки измеренных значений. Во-вторых, исключается погрешность, обусловленная измерением длительности временного интервала [2].

При формировании двух и более переходных процессов на участках ИЦД можно обеспечить дальнейшее сокращение времени измерения [3].

ЕДПП в общем случае имеет сложную схему замещения, включающую в себя как информативный параметр (емкость), так и целый ряд неинформативных параметров (сопротивление соединительных проводников, эквивалентное сопротивление, обусловленное потерями в изолирующем диэлектрике и сквозными токами утечки, и т. д.). Очевидно, что учет многоэлементной схемы датчика за счет использования неинформативных параметров может существенно повысить точность определения емкости [4].

В [5] авторами предложен метод, который обеспечивает раздельное определение емкости, сопротивлений соединительного проводника и изоляции.

Метод заключается в том, что на измерительную цепь, состоящую из последовательно включенных первого и второго образцовых резисторов с сопротивлением R_0 , ЕДПП, имеющего емкость C_X , сопротивления соединительного проводника R_{X1} и сопротивления изоляции R_{X2} , подают напряжение постоянного тока U_0 ; через образцовый интервал времени Δt одновременно измеряют мгновенные значения напряжений на участке цепи, содержащем второй образцовый резистор и емкостной датчик, и ЕДПП относительно общего вывода ИЦД; через образцовый интервал времени Δt повторно измеряют мгновенное значение напряжения на том же участке цепи относительно общего вывода; через такой же интервал времени Δt измеряют мгновенное значение напряжения на том же участке цепи относительно общего вывода и определяют неизвестные C_X , R_{X1} и R_{X2} по измеренным значениям.

На рис. 1 представлены временные диаграммы, поясняющие метод.

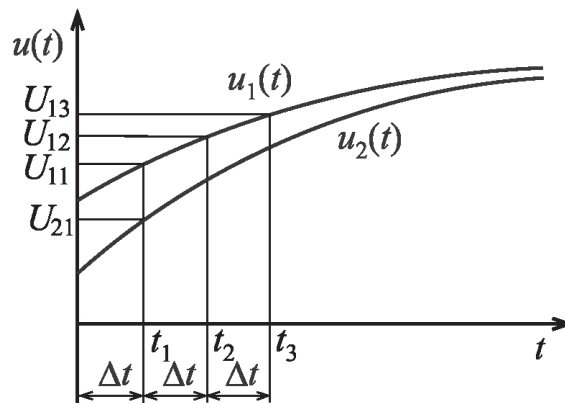


Рис. 1. Временные диаграммы, характеризующие метод

При подключении напряжения U_0 к измерительной цепи переходные процессы на участке цепи, содержащем второй образцовый резистор и ЕДПП, и на емкостном датчике относительно общего вывода ИЦД имеют следующий вид:

$$u_1(t) = \frac{U_0}{2} \left\{ R_0 + R_{X1} + \frac{R_{X2}R_0}{2R_0 + R_{X1} + R_{X2}} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \right\};$$

$$u_2(t) = \frac{U_0}{2} \left\{ R_{X1} + \frac{2R_{X2}R_0}{2R_0 + R_{X1} + R_{X2}} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \right\};$$

где $\tau = \frac{C_X(2R_0 + R_{X1})R_{X2}}{2R_0 + R_{X1} + R_{X2}}$.

Мгновенные значения напряжений на соответствующих участках ИЦД в моменты времени t_1 , t_2 и t_3 будут равны:

$$U_{11} = \frac{U_0}{2R_0 + R_{X1}} \left\{ R_0 + R_{X1} + \frac{R_0R_{X2}}{2R_0 + R_{X1} + R_{X2}} \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) \right] \right\};$$

$$U_{21} = \frac{U_0}{2R_0 + R_{X1}} \left\{ R_{X1} + \frac{2R_0R_{X2}}{2R_0 + R_{X1} + R_{X2}} \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) \right] \right\};$$

$$U_{12} = \frac{U_0}{2R_0 + R_{X1}} \left\{ R_0 + R_{X1} + \frac{R_0R_{X2}}{2R_0 + R_{X1} + R_{X2}} \left[1 - \exp\left(-\frac{2\Delta t}{\tau}\right) \right] \right\};$$

$$U_{13} = \frac{U_0}{2R_0 + R_{X1}} \left\{ R_0 + R_{X1} + \frac{R_0R_{X2}}{2R_0 + R_{X1} + R_{X2}} \left[1 - \exp\left(-\frac{3\Delta t}{\tau}\right) \right] \right\}.$$

Используя данные мгновенные значения напряжений после преобразований, можно определить неизвестные сопротивления соединительного проводника и изоляции и емкость ЕДПП:

$$R_{X1} = \frac{R_0 \left[U_{21}(U_{13} - U_{12}) - 2(U_{12} - U_{11})^2 \right]}{(U_{13} - U_{12})(U_{11} - U_{21}) + (U_{12} - U_{11})^2}; \quad (1)$$

$$R_{X2} = \frac{(2R_0 + R_{X1})^2 (U_{12} - U_{11})^3}{R_0(2U_{11} - U_{21})(U_{13} - U_{12})(2U_{12} - U_{11} - U_{13}) - (2R_0 + R_{X1})(U_{12} - U_{11})^3}; \quad (2)$$

$$C_X = -\frac{(2R_0 + R_{X1} + R_{X2})\Delta t}{(2R_0 + R_{X1})R_{X2} \ln\left(\frac{U_{13} - U_{12}}{U_{12} - U_{11}}\right)}. \quad (3)$$

Использование значений сопротивлений R_{X1} и R_{X2} , полученных согласно (1) и (2), для определения емкости ЕДПП в соответствии с выражением (3) обеспечивает увеличение точности измерения C_X .

Один из вариантов функциональной схемы измерительного средства (ИС), с помощью которого может быть реализован данный метод, приведен на рис. 2.

ИС содержит: источник опорного напряжения постоянного тока ИН; аналоговый ключ КЛ; измерительную цепь ИЦ; два аналого-цифровых преобразователя АЦП1 и АЦП2 и контроллер КНТ с шинами управления ШУ и данных ШД.

При реализации исследуемого метода определения параметров ЕДПП используется преобразование мгновенных значений переходных процессов в код.

Использование в цифровых ИС квантования по уровню неизбежно приводит к погрешности, которая оказывает влияние на результат определения параметров.

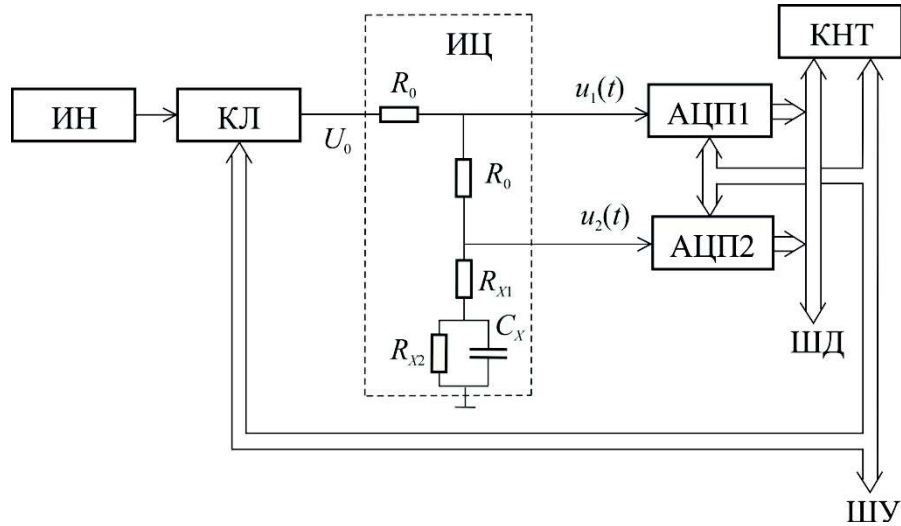


Рис. 2. Функциональная схема ИС, реализующего метод

Для анализа влияния квантования на погрешность определения емкости может быть использована известная методика, которая заключается в том, что точность результата определения информативного параметра можно оценить погрешностью вычисления значения функции, аргументы которой заданы приближенно и соответствуют погрешностям квантования мгновенных значений сигнала [6].

Если считать, что мгновенные значения напряжений U_{11} , U_{21} , U_{12} и U_{13} измеряются с погрешностью преобразования АЦП и абсолютные погрешности измерения равны $\Delta U_{11} = \Delta U_{12} = \Delta U_{13} = \Delta U = U_0 / 2^n$ (где n – разрядность АЦП), то абсолютная погрешность определения C_X согласно (3) с учетом погрешности квантования АЦП будет равна

$$\Delta C_X = \left[\left| \frac{\partial C_X}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial C_X}{\partial U_{12}} \right| + \left| \frac{\partial C_X}{\partial U_{13}} \right| \right] \Delta U. \quad (4)$$

Используя выражения (3) и (4), можно определить предельную относительную погрешность измерения емкости ЕДПП:

$$\delta_C = \frac{\tau \left[1 + 2 \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) \right] (2R_0 + R_{X1} + R_{X2})(2R_0 + R_{X1})}{\Delta t 2^n R_0 R_{X2} \exp\left(-\frac{2\Delta t}{\tau}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) \right]}. \quad (5)$$

Анализ выражения (5) показывает, что погрешность зависит от разрядности АЦП, образцового интервала времени Δt , постоянной времени ИЦД τ , сопро-

тивления образцового резистора R_0 , сопротивления соединительного проводника R_{X1} и сопротивления изоляции датчика R_{X2} .

На рис. 3 и 4 представлены графики зависимости погрешности δ_C от отношения образцового интервала времени Δt к постоянной времени ИЦД τ и отношения сопротивления изоляции датчика R_{X2} к сопротивлению образцового резистора R_0 при $\frac{R_{X1}}{R_0} = 0,001$ и $\frac{R_{X1}}{R_0} = 0,1$ соответственно согласно выражению (5).

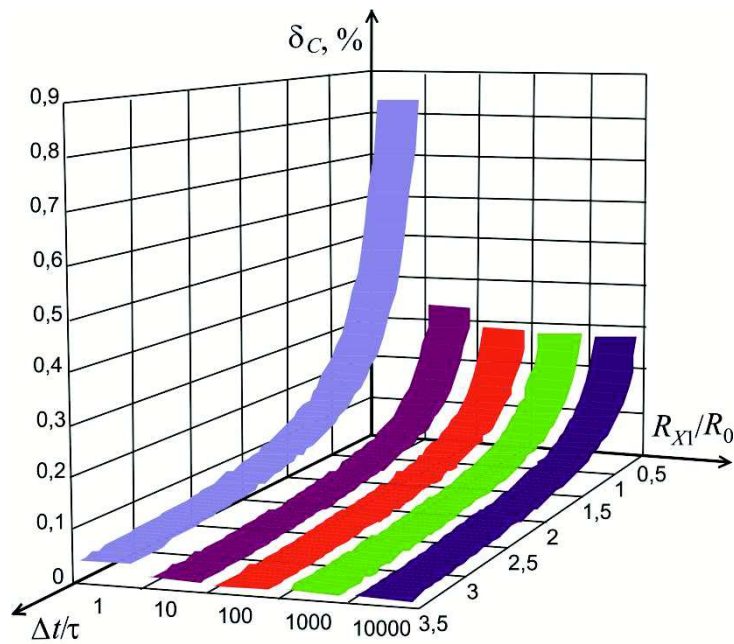


Рис. 3. Графики зависимости погрешности определения емкости от $\frac{\Delta t}{\tau}$ и $\frac{R_{X2}}{R_0}$ при $\frac{R_{X1}}{R_0} = 0,001$

Анализ рис. 3 и 4 показывает, что погрешность существенно зависит от $\frac{\Delta t}{\tau}$ и с увеличением данного отношения уменьшается. Кроме того, δ_C определяется отношением $\frac{R_{X2}}{R_0}$. Однако при $\frac{R_{X2}}{R_0} \geq 10$ погрешность практически не изменяется.

Зависимость погрешности от отношения $\frac{R_{X1}}{R_0}$ незначительна, и при достаточно малых значениях сопротивления соединительных проводников ее можно не принимать во внимание.

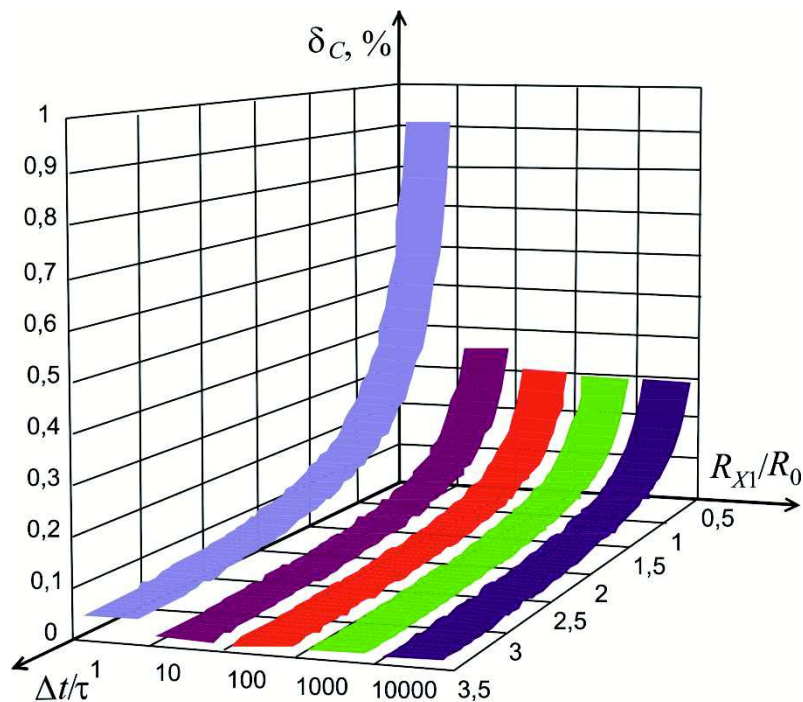


Рис. 4. Графики зависимости погрешности определения

емкости от $\frac{\Delta t}{\tau}$ и $\frac{R_{X2}}{R_0}$ при $\frac{R_{X1}}{R_0} = 0,1$

Полученные результаты обеспечивают возможность оптимального выбора блоков в соответствии с требованиями по точности измерения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Батищев В.И., Мелентьев В.С. Измерение параметров емкостных датчиков положения и перемещения. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 124 с.
2. Мелентьев В.С., Батищев В.И. Аппроксимационные методы и средства измерения и контроля параметров двухполюсных электрических цепей. – М.: Физматлит, 2012. – 200 с.
3. Мелентьев В.С. Новое в измерениях параметров емкостных датчиков по мгновенным значениям переходных процессов // Датчики и системы. – 2010. – № 2. – С. 26-29.
4. 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.
5. Мелентьев В.С. Методы повышения точности измерения параметров емкостных датчиков // Измерительная техника. – 2014. – № 7. – С. 45-47.
6. Мелентьев В.С., Евстифеева Т.С., Левина К.Д. Оценка погрешности реализации метода раздельного определения параметров емкостных датчиков // Южно-Сибирский научный вестник. – 2014. – № 2(6). – С. 29-31.

Статья поступила в редакцию 20 сентября 2015 г.

ANALYZING THE ERROR OF THE IMPLEMENTATION OF THE METHOD FOR DETERMINING SEPARATELY THE PARAMETERS OF A CAPACITIVE DISPLACEMENT SENSOR DUE TO THE NON-IDEAL MEASURING CIRCUIT

V.S. Melent'ev, K.D. Levina, E.A. Susova

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

This paper discusses a new method of measuring capacitive sensors parameters by the transients instantaneous values in the sections of a measuring circuit comprising two model elements. In contrast to the known methods based on the determination of the capacity of the individual transients instantaneous values, the implementation of the method provides a separate determination of both the capacity and insulation resistance of a capacitive sensor and the resistance of the conductor connecting the sensor to the measuring circuit. It improves the accuracy of the information parameter measurement. A block diagram of the measurement tool which implements the method is offered. The results of the analysis of the influence of the transients instantaneous-values quantization on the capacity determination error are presented. Using the results obtained, it is possible to make the optimal choice of blocks in accordance with the requirements for measurement accuracy.

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

*Vladimir S. Melent'ev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Ksenia D. Levina, Postgraduate Student.
Ekaterina A. Susova, Postgraduate Student.*