

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 621.317.33

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ ПО МГНОВЕННЫМ ЗНАЧЕНИЯМ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ*

В.С. Мелентьев, Е.А. Сузова, О.С. Склёз

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

E-mail: vs_mel@mail.ru

При контроле параметров технологических процессов, предусматривающих непрерывный мониторинг свойств или состояний различных веществ, разбраковку продукции по геометрическим размерам, контроль перемещения или положения механизмов, широкое распространение получили емкостные датчики. В настоящее время высокую производительность обеспечивают методы и системы определения параметров емкостных датчиков по отдельным мгновенным значениям переходного процесса в измерительной цепи при подключении к ней напряжения постоянного тока. Использование таких методов обеспечивает сокращение времени измерения, которое не зависит от постоянной времени измерительной цепи, а определяется в основном длительностью образцовых интервалов времени, используемых при реализации методов. Одной из проблем, возникающих при реализации средств измерений, использующих подобные методы, является влияние неинформативных параметров измерительной цепи и их нестабильности на результат определения информативных параметров. Учет неинформативных элементов схемы замещения датчика позволяет выявить их влияние на информативные параметры. Целью работы является исследование влияния сопротивления соединительных проводников, подключающих емкостной датчик к измерительной цепи, на погрешность измерения емкости.

Ключевые слова: измерительная цепь, переходный процесс, мгновенные значения, погрешность.

Датчики положения и перемещения находят очень широкое применение, поскольку контроль данных характеристик является важным элементом правильно-

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 16-08-00252 А).

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

Екатерина Александровна Сузова, аспирант.

Оксана Сергеевна Склёз, магистрант.

го функционирования большого числа разнообразных машин и механизмов [1].

В технологических процессах, где необходим непрерывный быстродействующий контроль свойств или состояний веществ [2], разбраковка продукции по свойствам или геометрическим размерам, все более широкое применение находят емкостные датчики (ЕД) положения и перемещения. В то же время многие физические величины измеряются с помощью их первичного преобразования в перемещения, которое они вызывают в образцах: это относится к измерению сил, давлений, ускорений, температур и т. д. [3, 4].

Использование мостовых схем для измерения емкости датчиков достаточно хорошо изучено [5]. В последнее время улучшение таких методов сводится в большей степени к совершенствованию способов автоматического уравнивания моста [4]. Однако реализация такого подхода к измерению емкости существенно увеличивает время измерения.

В последнее время все большее распространение находят методы определения параметров ЕД по отдельным мгновенным значениям (МЗ) переходного процесса (ПП) в измерительной цепи (ИЦ) при подключении к ней напряжения постоянного тока. В данных методах время измерения не зависит от постоянной времени ИЦ τ , а определяется в основном временем измерения мгновенных значений ПП и реализации алгоритма обработки измеренных значений, а также длительностью образцовых интервалов времени, используемых при реализации методов.

Еще одним фактором, оказывающим влияние на время измерения емкости, является то, как связаны между собой момент начала измерения МЗ переходного процесса и момент подключения напряжения к измерительной цепи.

В [6] авторами предложен метод измерения емкости датчика, который основан на использовании двух измерительных цепей: основной и вспомогательной. Метод обеспечивает возможность начала измерения в произвольный момент времени после начала измерительного процесса, что значительно расширяет возможности его применения.

Метод основан на том, что на первую последовательную активно-емкостную цепь, состоящую из неизвестных по значению элементов, средняя точка которой подключена ко второй последовательной ИЦ, состоящей из образцового резистора и емкостного датчика, подают напряжение постоянного тока; в произвольный момент времени одновременно измеряют первые МЗ переходных процессов на средних точках обеих цепей; через образцовый интервал времени с момента первого измерения одновременно измеряют вторые МЗ напряжений на средних точках обеих цепей и определяют неизвестную емкость второй ИЦ по полученным значениям.

Метод можно пояснить с помощью временных диаграмм (рис. 1).

Напряжение на средней точке первой ИЦ изменяется по закону

$$u_1(t) = U_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \right], \quad (1)$$

где $\tau_1 = R_1 C_1$ – постоянная времени первой измерительной цепи.

Напряжение со средней точки первой измерительной цепи подается на вторую ИЦ. Напряжение на средней точке данной измерительной цепи равно

$$u_2(t) = u_1(t) \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right] = U_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \right], \quad (2)$$

где $\tau_2 = R_0 C_X$ – постоянная времени второй ИЦ.

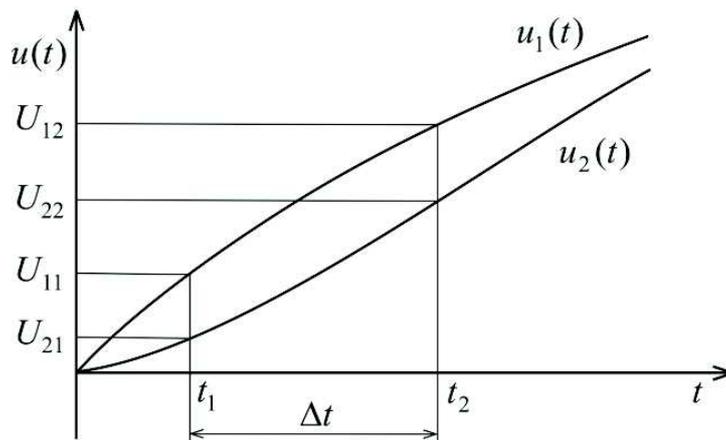


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

МЗ переходных процессов (1) и (2) в моменты времени t_1 и t_2 будут равны

$$U_{11} = U_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_1}\right) \right]; U_{21} = U_{11} \left[1 - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_2}\right) \right];$$

$$U_{12} = U_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t_1 + \Delta t}{\tau_1}\right) \right]; U_{22} = U_{12} \left[1 - \exp\left(-\frac{t_1 + \Delta t}{\tau_2}\right) \right].$$

Используя данные выражения, можно найти значение емкости:

$$C_X = -\frac{\Delta t}{R_0 \ln \left[\frac{(U_{22} - U_{12})U_{11}}{(U_{21} - U_{11})U_{12}} \right]}. \quad (3)$$

Схема информационно-измерительной системы (ИИС), с помощью которой можно реализовать метод, приведена на рис. 2.

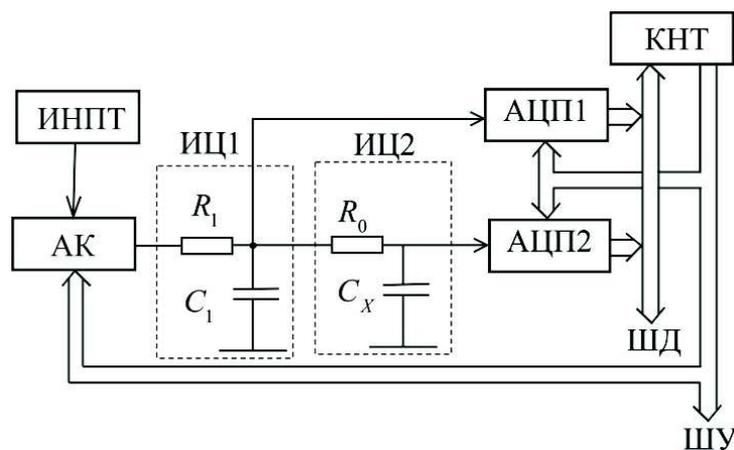


Рис. 2. ИИС, реализующая метод

В состав ИИС входят: источник опорного напряжения постоянного тока ИНПТ; аналоговый ключ АК; измерительные цепи ИЦ1 и ИЦ2; два аналого-цифровых преобразователя АЦП1 и АЦП2; контроллер КНТ с шинами управления ШУ и данных ШД.

Одной из проблем, которые возникают при построении средств измерений,

реализующих данный метод, является влияние неинформативных параметров ИЦ и их нестабильности на результат определения информативных параметров [7].

Учет неинформативных элементов схемы замещения ЕД позволяет выявить их влияние на информативные параметры. К таким элементам, в том числе, относится сопротивление соединительных проводников, подключающих емкостной датчик к ИЦ. Наличие данного сопротивления приводит к отклонению реального переходного процесса от используемой модели, что вызывает дополнительную погрешность определения емкости датчика.

С учетом сопротивлений соединительных проводников R_{Π} постоянная времени ИЦ примет вид

$$\tau_p = C_X(R_0 + R_{\Pi}).$$

Проведем оценку предельной погрешности определения емкости, обусловленной конечным значением сопротивления соединительных проводников, используя методику, предложенную в [8]. Методика заключается в определении погрешности измерения параметра как функции, аргументы которой заданы приближенно с погрешностью, соответствующей отклонению модели от реального процесса в ИЦ.

Так как первая ИЦ может иметь в общем случае произвольные параметры, то считая, что предельные абсолютные погрешности аргументов соответствуют наибольшему отклонению параметров модели от реального ИП во второй измерительной цепи ΔU_{\max} , получим значение абсолютной погрешности измерения емкости в соответствии с (3):

$$\Delta C_X = \left[\left| \frac{\partial C_X}{\partial U_{21}} \right| + \left| \frac{\partial C_X}{\partial U_{22}} \right| \right] \Delta U_{\max}. \quad (4)$$

Предельная относительная погрешность определения C_X с учетом (3) и (4) примет вид

$$\delta_C = \frac{\tau_2}{\Delta t} \left\{ \frac{2 - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_2}\right) \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_2}\right)}{\exp\left(-\frac{t_1}{\tau_2}\right) \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_2}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_1}\right) \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_1}\right) \right]} + \frac{2 - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_2}\right)}{\exp\left(-\frac{t_1}{\tau_2}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_1}\right) \right]} \right\} \times \left| \exp\left[-\frac{\tau_p \ln\left(\frac{\tau_p}{\tau}\right)}{\tau_p - \tau} \right] - \exp\left[-\frac{\tau \ln\left(\frac{\tau_p}{\tau}\right)}{\tau_p - \tau} \right] \right|. \quad (5)$$

Анализ выражения (5) показывает, что погрешность зависит от следующих соотношений: между образцовым интервалом времени Δt и постоянной времени второй ИЦ τ_2 ; между сопротивлением соединительных проводников R_{Π} и сопротивлением R_0 ; между интервалом времени с момента подключения опорного напряжения к измерительной цепи и моментом начала измерения t_1 и постоянной времени второй ИЦ τ_2 ; между постоянными времени обеих цепей τ_1 и τ_2 . Графики зависимости погрешности δ_C от $\Delta t/\tau_2$ и τ_1/τ_2 при $t_1 = 0,1\tau_2$, которые построены на

основе выражения (5), приведены на рис. 3 и 4 для $R_{II}/R_0 = 0,005$ и $R_{II}/R_0 = 0,001$ соответственно.

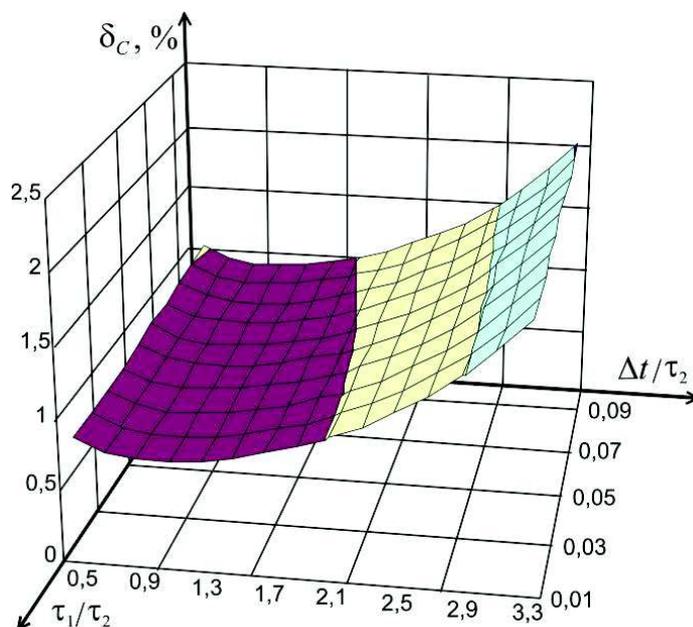


Рис. 3. Зависимость погрешности δ_C от $\Delta t/\tau_2$ и τ_1/τ_2 при $t_1 = 0,1\tau_2$ и $R_{II}/R_0 = 0,005$

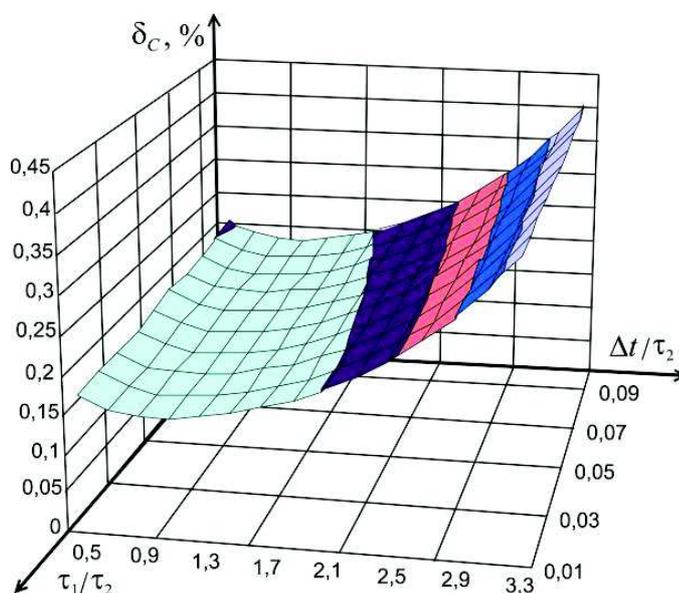


Рис. 4. Зависимость погрешности δ_C от $\Delta t/\tau_2$ и τ_1/τ_2 при $t_1 = 0,1\tau_2$ и $R_{II}/R_0 = 0,001$

Для оценки влияния соотношения между моментами начала измерительного процесса и подключения напряжения к ИЦ на рис. 5 приведен график зависимости погрешности δ_C от $\Delta t/\tau_2$ и τ_1/τ_2 при $t_1 = 0,5\tau_2$ для $R_{II}/R_0 = 0,005$.

Анализ рис. 3–5 показывает, что значение погрешности существенно зависит от отношения образцового интервала времени Δt к постоянной времени ИЦ τ_2 . При уменьшении соотношения между сопротивлением соединительных провод-

ников R_{II} и сопротивлением R_0 погрешность уменьшается.

Погрешность практически не зависит от отношения постоянных времени обеих цепей в диапазоне изменения $0 < \frac{\tau_1}{\tau_2} \leq 0,1$, если выбрать сопротивления резисторов в первой и второй ИЦ одинаковыми. Это позволяет оставлять значения элементов первой измерительной цепи постоянными при достаточно широком диапазоне изменения емкости.

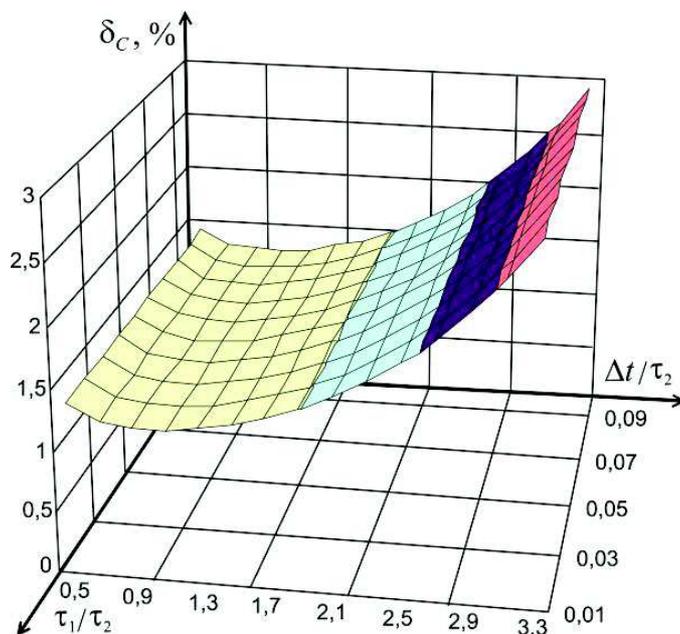


Рис. 5. Зависимость погрешности δ_C от $\Delta t/\tau_2$ и τ_1/τ_2 при $t_1 = 0,5\tau_2$ и $R_{II}/R_0 = 0,005$

Исследованный в статье метод измерения емкости датчика, основанный на использовании двух измерительных цепей, параметры одной из которых могут быть выбраны произвольным образом, обеспечивает возможность начала измерения в произвольный момент времени после начала переходного процесса в ИЦ, что значительно расширяет возможности его применения.

Полученные аналитические выражения для определения погрешности измерения емкости, а также приведенные графики погрешности позволяют производить оптимальный выбор параметров измерительного процесса и значения сопротивления образцового резистора в зависимости от требуемой точности и времени измерения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Хашемиан Х.* Датчики технологических процессов. Характеристики и методы повышения надежности. – М.: Бином, 2008. – 336 с.
2. *Батищев В.И., Мелентьев В.С.* Измерение параметров емкостных датчиков положения и перемещения. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 124 с.
3. *Azimloo H., Rezazadeh G., Shabani R.* Development of a capacitive angular velocity sensor for the alarm and trip applications // Measurement. – 2015. – V. 63. – P. 282–286.
4. *Nerino R., Cabiati F., Picotto G.B., Sacconi A.* A surface profile reconstruction method based on multisensor capacitive transducers // Measurement. – 1994. – V. 13, I. 1. – P. 77–84.
5. *Малиновский В.Н.* Цифровые измерительные мосты. – М.: Энергия, 1976.
6. *Мелентьев В.С., Батищев В.И.* Аппроксимационные методы и средства измерения параметров двухполюсных электрических цепей. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 200 с.

7. *Melent'ev V.S.* Methods for increasing the accuracy of measurements of the parameters of capacitive transducers // *Measurement Techniques*. – 2014. – V. 57, No. 7. – P. 800–804.
8. *Мелентьев В.С., Костенко Е.В., Латухова О.А.* Оценка погрешности метода измерения параметров двухполюсных электрических цепей по мгновенным значениям из-за отклонения реального переходного процесса от модели // *Математическое моделирование и краевые задачи: Тр. VIII Всерос. науч. конф. с междунар. участием*. – Самара: СамГТУ, 2011. – Ч. 2. – С. 189–192.

Статья поступила в редакцию 3 октября 2016 г.

STUDY OF THE ERROR OF THE METHOD OF DETERMINATION OF PARAMETERS OF CAPACITOR SENSORS ON INSTANT VALUES OF TRANSIENT PROCESSES

V.S. Melent'ev, E.A. Susova, O.S. Sklez

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

In the control of parameters technological processes, which allow to do the continuous monitoring of the properties or conditions of various materials, grading products by the geometric dimensions, control of movement or position of the mechanisms, widespread capacitive sensors. Currently, high performance provide methods and systems of determining parameters of capacitive sensors for individual instantaneous values of the transition process in the measuring circuit when their connected to a DC voltage. The use of such methods provides a reduction in measurement time, which does not depend on the time constant of the measuring circuit, and is mainly determined by the duration of intervals used to implement the methods. One of the problems arising in the implementation of measurement tools using similar techniques, it is the effect of uninformative parameters of the measuring circuit and their instability on the result of the determination of informative parameters. Accounting uninformative elements of the equivalent circuit of the sensor allows to determine their influence on informative parameters. The aim of this work is to study the influence of resistance of connecting wires that connect the sensor to the measurement circuit, on capacity measurement error.

Keywords: *the measuring circuit, transient, instant values, an error.*

*Vladimir S. Melent'ev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Ekaterina A. Susova, Postgraduate Student.
Oksana S. Sklez, Graduate Student.*