

Литература

1. **Pat.** No 4054881 US. Remote object position locator. Raab F.H. 1977.
2. **Pat.** No 4849692 US. Device for quantitatively measuring the relative position and orientation of two bodies in the presence of metals utilizing direct current magnetic fields. Blood E., 1989.
3. **Пат. 2413957 РФ.** Способ определения линейного положения и ориентации подвижного объекта / М. В. Желамский // Бюл. Изобрет. № 7.
4. **Желамский М. В.** Электромагнитное позиционирование подвижных объектов. М.: Физматлит, 2013 г.
5. **Желамский М. В.** Первая отечественная система магнитного позиционирования в полном объеме технических требований // Датчики и системы. 2009 г. № 1. С. 2—7.
6. **Желамский М. В.** Первый отечественный магнитный трекер для целеуказания // Датчики и системы. 2011. № 1. С. 9—15.

7. **Curran K. e. a.** An Evaluation of Indoor Location Determination Technologies // J. of Location Based Services. 2011. V. 5. N. 2. P. 61—78.

8. **Афанасьев Ю.В. и др.** Средства измерений параметров магнитного поля. Л.: Энергия, 1979.

9. **Золотов Е.** Плюсы и минусы indoor-навигации. [Электрон. ресурс] <http://ibusiness.ru/blogs/14424> (дата обращения 06.06.2014)

10. **Желамский М. В.** Глобальная система виртуальной и дополненной реальности для закрытых пространств // Датчики и системы. 2009. № 7. С. 33—37.

Дата принятия 04.04.2014 г.

621.317.33

Методы повышения точности измерений параметров емкостных датчиков

В. С. МЕЛЕНТЬЕВ

Самарский государственный технический университет, Самара, Россия,
e-mail: vs_mel@mail.ru

Рассмотрены методы раздельного определения параметров емкостных датчиков по мгновенным значениям переходных процессов в измерительной цепи, которые обеспечивают повышение точности измерений в результате использования многоэлементной схемы замещения датчика.

Ключевые слова: емкостной датчик, переходный процесс, мгновенные значения, сопротивление проводника и изоляции.

The methods of separate determination of capacitive transducers parameters by instant values of transient processes in measuring circuit are considered. Methods provide an increase of measurement accuracy due to taking into account a multielement equivalent circuit of the sensor.

Key words: capacitive transducer, transient process, instant values, resistance of conductors, resistance of isolation.

В настоящее время для измерений параметров емкостных датчиков (ЕД) достаточно широко используют методы, в которых информативные параметры вычисляют по мгновенным значениям переходного процесса в измерительной цепи (ИЦ). Реализация данных методов обеспечивает сокращение времени измерения.

При измерениях часто требуется определить не только информативные, но и паразитные (неинформативные) параметры. Применение многоэлементной схемы замещения ЕД, построенной на основе априорной информации об объекте исследования, повышает точность определения информативных параметров [1].

Известные методы и средства измерений параметров ЕД по мгновенным значениям переходного процесса не учитывают, в частности, сопротивление соединительных проводников, с помощью которых датчик подключают к ИЦ. Также неинформативным элементом ЕД является эквивалентное сопротивление, обусловленное потерями в изолирующем диэлектрике и сквозными токами утечки. Все это приводит к

отклонению реального переходного процесса от предполагаемой модели, что неизбежно вызывает дополнительную погрешность определения информативного параметра датчика.

Методы раздельного определения параметров емкостных датчиков.

1. **Метод определения емкости датчика и сопротивления соединительных проводников.** В [2] предложен метод для исключения погрешности измерения емкости датчика, обусловленной конечными значениями сопротивлений соединительных проводников. Он заключается в том, что на ИЦ, состоящую из последовательно включенных первого и второго образцовых резисторов сопротивлением R_0 , ЕД емкостью C_d и соединительных проводников сопротивлениями R_1 , R_2 , подают напряжение постоянного тока U_0 . Одновременно через образцовый интервал времени Δt измеряют мгновенные значения напряжений U_{11} на участке цепи, содержащем второй образцовый резистор и ЕД, и U_{21} — на емкостном датчике относительно общего вывода ИЦ.

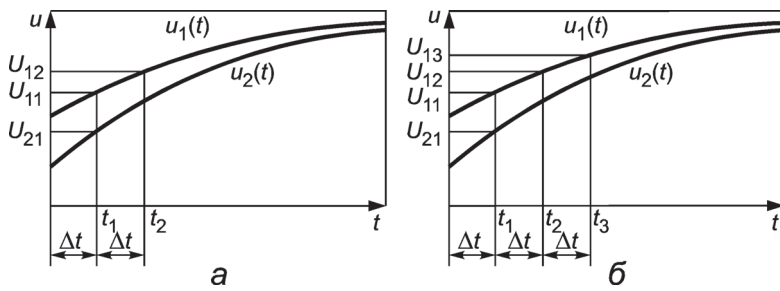


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие первый (а) и третий (б) методы

Через интервал Δt повторно измеряют U_{12} на том же участке цепи, и по полученным значениям определяют неизвестные емкость и сопротивления соединительных проводников. Временные диаграммы, поясняющие метод, приведены на рис. 1, а.

Если к ИЦ подключить напряжение постоянного тока U_0 , то напряжения на участке цепи, содержащем второй образцовый резистор и ЕД, и на ЕД в текущий момент времени t будут определяться как

$$u_1(t) = U_0 [1 - (R_0 \exp(-t/\tau) / (2R_0 + R_n))];$$

$$u_2(t) = U_0 [1 - (2R_0 \exp(-t/\tau) / (2R_0 + R_n))],$$

где $R_n = R_1 + R_2$; $\tau = C_d (2R_0 + R_n)$ — постоянная времени ИЦ.

Переходные процессы, возникающие в ИЦ, в общем случае характеризуются пятью параметрами: C_d , R_n , R_0 , U_0 , t ,

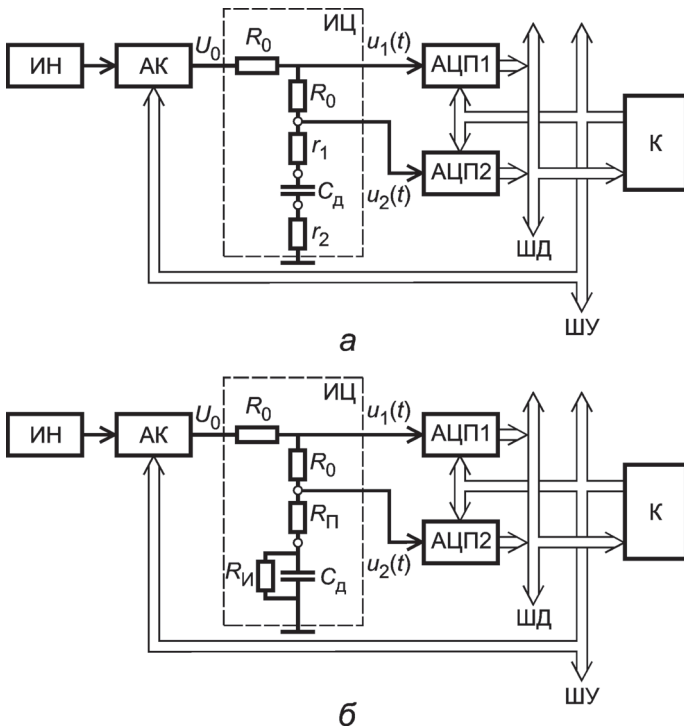


Рис. 2. Схемы информационно-измерительной системы, реализующие первый (а) и третий (б) методы:

ИН — источник напряжения; АК — аналоговый ключ; ИЦ — измерительная цепь; АЦП1, АЦП2 — аналогово-цифровые преобразователи; ШД, ШУ — шины данных и управления, соответственно; К — контроллер

так как рассматриваемый процесс непериодический. Один из них (R_0) известен. Для сокращения числа уравнений при определении параметров ЕД мгновенные значения переходных процессов измеряют через интервал времени Δt с момента подачи напряжения U_0 . В этом случае можно составить систему из трех уравнений

$$\begin{cases} U_0 [1 - (R_0 \exp(-\Delta t / \tau) / (2R_0 + R_n))] = U_{11}; \\ U_0 [1 - (2R_0 \exp(-\Delta t / \tau) / (2R_0 + R_n))] = U_{21}; \\ U_0 [1 - (R_0 \exp(-2\Delta t / \tau) / (2R_0 + R_n))] = U_{12}. \end{cases} \quad (1)$$

После несложных преобразований в (1) неизвестные сопротивление R_n и емкость C_d определим как:

$$R_n = R_0 (U_{11} - U_{12})^{-2} [2U_{11}(U_{11} - U_{12}) + U_{21}(U_{12} - U_{21}) - 2U_{21}^2]; \quad (2)$$

$$C_d = -\Delta t [(2R_0 + R_n) \ln \{ (2U_{11} - U_{21} - U_{12}) / (U_{11} - U_{21}) \}]^{-1}. \quad (3)$$

При определении емкости согласно (3) используем полученное в соответствии с (2) сопротивление R_n , что увеличит точность измерений.

Схема информационно-измерительной системы, реализующей метод, приведена на рис. 2, а. В состав системы входят: источник опорного напряжения постоянного тока ИН; аналоговый ключ АК; измерительная цепь ИЦ; два аналого-цифровых преобразователя АЦП1, АЦП2; контроллер К с шиной управления ШУ и шиной данных ШД. Повышение точности определения емкости датчика может быть обеспечено также вследствие учета другого неинформативного параметра — эквивалентного сопротивления, обусловленного потерями в изолирующем диэлектрике и сквозными токами утечки ЕД.

2. Метод определения емкости и сопротивления изоляции датчика. В [3] предложен метод для отдельного определения как емкости, так и сопротивления изоляции емкостного датчика. Он заключается в том, что на ИЦ, состоящую из двух последовательно включенных образцовых резисторов R_0 и ЕД емкостью C_d и сопротивлением изоляции $R_{и}$, подают напряжение постоянного тока U_0 . Через интервал Δt в момент времени t_1 одновременно измеряют мгновенные значения U_{11} и U_{21} переходных процессов. Далее через тот же интервал Δt в момент времени t_2 измеряют U_{12} на том же участке цепи и определяют неизвестные емкость и сопротивление изоляции по измеренным значениям.

После подключения напряжения U_0 к ИЦ напряжения $u_1(t)$, $u_2(t)$ изменяются:

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

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

где $\tau = 2C_d R_0 R_{и} / (2R_0 + R_{и})$.

Мгновенные значения напряжений в соответствующие моменты времени t_1 , t_2 примут вид

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

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

$$U_{12} = \frac{U_0}{2} \left\{ 1 + \frac{R_{\text{и}}}{2R_0 + R_{\text{и}}} \left[1 - \exp\left(-\frac{2\Delta t}{\tau}\right) \right] \right\}.$$

Используя эти значения, можно определить неизвестные сопротивление изоляции и емкость ЕД:

$$R_{\text{и}} = \frac{R_0 U_{21}^2}{2U_{11}(U_{11} - U_{12}) + U_{21}(U_{12} - U_{21})}; \quad (4)$$

$$C_{\text{д}} = -\frac{(2R_0 + R_{\text{и}})\Delta t}{2R_0 R_{\text{и}} \ln \left[\frac{2(U_{12} - U_{11})}{U_{21}} \right]}. \quad (5)$$

Применение $R_{\text{и}}$, полученное по (4), для вычисления емкости ЕД в соответствии с (5) также повышает точность измерений $C_{\text{д}}$. Дальнейшее повышение точности возможно в результате учета как сопротивления соединительных проводников, так и эквивалентного сопротивления, обусловленного потерями в изолирующем диэлектрике и сквозными токами утечки ЕД.

3. Метод определения емкости, сопротивления изоляции датчика и сопротивления соединительных проводников. Следующий, разработанный автором метод, позволяет определять помимо емкости еще и перечисленные выше неинформативные параметры. Он заключается в том, что на измерительную цепь, состоящую из последовательно включенных первого и второго образцовых резисторов сопротивлением R_0 , ЕД емкостью $C_{\text{д}}$, сопротивления соединительного проводника $R_{\text{п}}$ и сопротивления изоляции $R_{\text{и}}$, подают напряжение постоянного тока U_0 . Через образцовый интервал времени Δt одновременно измеряют U_{11} , U_{21} . Далее через тот же интервал Δt повторно измеряют U_{12} , а еще через интервал Δt измеряют U_{13} на том же участке цепи и определяют неизвестные емкость, сопротивление соединительного проводника и сопротивление изоляции по измеренным значениям.

Временные диаграммы, поясняющие метод, приведены на рис. 1, б. После подключения напряжения U_0 к ИЦ напряжения $u_1(t)$, $u_2(t)$ изменятся:

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

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

где $\tau = C_{\text{д}} R_{\text{и}} (2R_0 + R_{\text{п}}) / (2R_0 + R_{\text{п}} + R_{\text{и}})$.

Мгновенные значения напряжений переходных процессов в моменты времени t_1 , t_2 , t_3 примут вид

$$U_{11} = \frac{U_0}{2R_0 + R_{\text{п}}} \left\{ R_0 + R_{\text{п}} + \frac{R_0 R_{\text{и}}}{2R_0 + R_{\text{п}} + R_{\text{и}}} \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) \right] \right\}; \quad (6)$$

$$U_{21} = \frac{U_0}{2R_0 + R_{\text{п}}} \left\{ R_{\text{п}} + \frac{2R_0 R_{\text{и}}}{2R_0 + R_{\text{п}} + R_{\text{и}}} \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) \right] \right\}; \quad (7)$$

$$U_{12} = \frac{U_0}{2R_0 + R_{\text{п}}} \left\{ R_0 + R_{\text{п}} + \frac{R_0 R_{\text{и}}}{2R_0 + R_{\text{п}} + R_{\text{и}}} \left[1 - \exp\left(-\frac{2\Delta t}{\tau}\right) \right] \right\}; \quad (8)$$

$$U_{13} = \frac{U_0}{2R_0 + R_{\text{п}}} \left\{ R_0 + R_{\text{п}} + \frac{R_0 R_{\text{и}}}{2R_0 + R_{\text{п}} + R_{\text{и}}} \left[1 - \exp\left(-\frac{3\Delta t}{\tau}\right) \right] \right\}. \quad (9)$$

Учитывая (6)–(9), можно определить неизвестные сопротивления соединительного проводника, изоляции и емкость ЕД:

$$R_{\text{п}} = \frac{R_0 \left[U_{21}(U_{13} - U_{12}) - 2(U_{12} - U_{11})^2 \right]}{(U_{13} - U_{12})(U_{11} - U_{21}) + (U_{12} - U_{11})^2}; \quad (10)$$

$$R_{\text{и}} = \frac{(2R_0 + R_{\text{п}})^2 (U_{12} - U_{11})^3}{R_0 (2U_{11} - U_{21})(U_{13} - U_{12})(2U_{12} - U_{11} - U_{13})} \rightarrow \frac{1}{-(2R_0 + R_{\text{п}})(U_{12} - U_{11})^3}; \quad (11)$$

$$C_{\text{д}} = -\frac{(2R_0 + R_{\text{п}} + R_{\text{и}})\Delta t}{(2R_0 + R_{\text{п}}) R_{\text{и}} \ln \left[\frac{(U_{13} - U_{12})}{(U_{12} - U_{11})} \right]}. \quad (12)$$

Использование сопротивлений $R_{\text{п}}$, $R_{\text{и}}$, полученных из (10), (11), для вычисления емкости ЕД в соответствии с (12) также способствует повышению точности определения $C_{\text{д}}$.

Схема информационно-измерительной системы, реализующей метод, приведена на рис. 2, б. Она отличается от представленной на рис. 2, а только составом ИЦ.

Выводы. Разработанные методы измерений параметров емкостных датчиков позволяют повысить точность вследствие использования многоэлементной схемы замещения датчика. Третий метод применяется для измерений как сопротивления соединительного проводника, так и сопротивления изоляции емкостного датчика, учет которых при определении емкости датчика приводит к повышению точности.

Все рассмотренные методы могут быть реализованы с помощью одной и той же информационно-измерительной системы без изменения ее структуры.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 13-08-00173-а).

Литература

1. Мартышин А. И., Шахов Э. К., Шляндин В. М. Преобразование электрических параметров для систем контроля и измерения. М.: Энергия, 1976.
2. Мелентьев В. С., Смолина А. М., Евстифеева Т. С. Совершенствование метода измерения параметров емкостных датчиков // Проблемы автоматизации и управления в технических системах: Сб. Междуна. науч.-техн. конф.: Пенза: ПГУ, 2013. С. 238–240.
3. Мелентьев В. С. и др. Исследование метода раздельного определения параметров емкостных датчиков // Информационные технологии в науке и производстве: Материалы Всерос. науч.-техн. конф.: Самара: СГТУ, 2013. С. 91–95.

Дата принятия 15.04.2014 г.