

**ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПАРАМЕТРОВ БЕСКОНТАКТНЫХ ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ
ДЛЯ КОНДУКТОДИЭЛЬКОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

© 2016 А.В. Грачев, П.П. Чураков

Пензенский государственный университет

Статья поступила в редакцию 15.04.2016

В статье рассматривается преобразователь параметров четырехэлементной электрической схемы замещения бесконтактного емкостного датчика для кондуктодиэлектрических измерений неэлектрических величин. Представлены уравнения преобразования по каждому из параметров и рекомендации по практической реализации. Достоинствами преобразователя являются широкие функциональные возможности и коррекция дополнительных погрешностей.

Ключевые слова: бесконтактный емкостной датчик, кондуктодиэлектрические измерения, функциональные возможности и погрешности преобразования, параметры эквивалентной электрической схемы замещения.

Емкостные кондукто- и диэлектрические датчики широко используются [1,2,3,4] для измерения влажности сыпучих и твердых веществ, для анализа состава жидкостей при контроле сточных вод, определении концентрации растворов и качества жидкого топлива и нефти, а так же при проведении ряда медико-биологических исследований. Среди таких датчиков лучшими характеристиками обладают бесконтактные емкостные датчики (БЕД), в которых отсутствует непосредственный контакт обкладок конденсатора БЕД с веществом, параметры которого измеряются. Первичными информативными параметрами БЕД могут являться изменение активного сопротивления (удельной проводимости)- кондуктометрические датчики и измерения или изменение электрической емкости (диэлектрическая проницаемость)- диэлектрические датчики и измерения. Методы построения и области применения емкостных датчиков весьма разнообразны [5,6,7,8,9].

Точность измерительных устройств с емкостными датчиками во многом определяется адекватностью используемой электрической схемы замещения БЕД, как источника первичной информации. По этой причине в настоящее время при построении унифицирующих преобразователей параметров емкостных датчиков используют методы измерения параметров многоэлемент-

Чураков Петр Павлович доктор технических наук, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника и метрология», руководитель регионального учебного «Центра технологий National Instruments», член диссертационных советов при Пензенском государственном университете и Воронежском государственном техническом университете; член экспертного совета ВАК РФ по электронике, измерительной технике, радиотехнике и связи. E-mail: churakov.pp@gmail.com

Грачев Андрей Владимирович начальник отдела технических средств обучения. E-mail: andean@mail.ru

ных электрических цепей. Среди этих методов следует выделить инвариантные методы [10,11] с использованием активных измерительных цепей и импульсных опорных воздействий, эквивалентных многократному воздействию.

На рис. 1 приведена функциональная схема преобразователя [12] параметров БЕД в напряжении с использованием комбинированного метода обеспечения инвариантности [13] с временным и пространственным разделением каналов обработки сигналов. Преобразователь содержит: узел управления УУ, формирователь опорного напряжения ФОН, бесконтактный емкостной датчик БЕД, операционный ОУ и вычитающий ВУ усилители, масштабирующий преобразователь МП, первый ОК1 и второй ОК2 опорные конденсаторы, три узла выборки и хранения (УВХ1, УВХ2, УВХ3, четыре логометрических преобразователя (ЛП1, ЛП2, ЛП3, ЛП4), дифференциатор Д с переменными параметрами, компаратор напряжений КН, элемент задержки ЭЗ, одновибратор ОВ и три выпрямителя (В1, В2, В3).

Бесконтактный емкостной датчик БЕД характеризуется эквивалентной электрической схемой замещения со следующими параметрами: С1 – емкость, обусловленная диэлектрическими свойствами изоляции электродов; R1 – активное электрическое сопротивление раствора или вещества, находящегося между электродами датчика; С2 – емкость, обусловленная полярными свойствами этого раствора или вещества; С3 – «геометрическая» емкость между электродами незаполненного датчика, определяемая конструкцией, размерами датчика и дополнительной емкостью соединительного кабеля в режиме телеизмерений.

На первом этапе при незагруженном датчике осуществляется компенсация влияния «геометрической» емкости С3 БЕД. При этом по сигналу

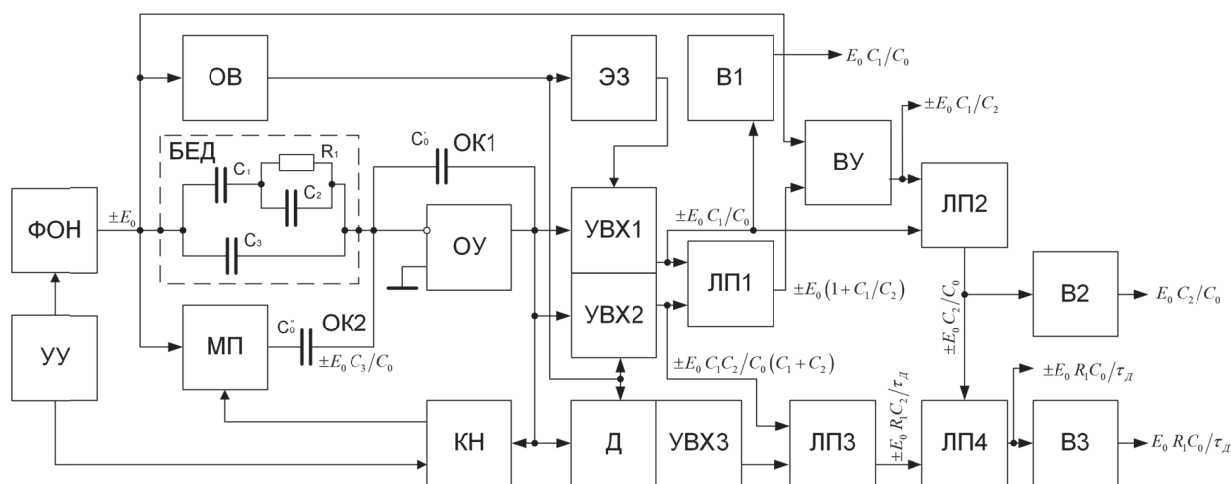


Рис. 1. Функциональная схема преобразователя параметров БЕД в напряжении

с КН осуществляется регулирование коэффициента передачи МП до момента получения на выходе ОУ весьма малого скомпенсированного сигнала, определяемого порогом срабатывания КН, который работает при наличии разрешающего сигнала на втором выходе УУ. Данный процесс описывается следующими сигналами (напряжениями) на выходе узлов преобразователя.

На выходе ФОН формируется последовательность прямоугольных импульсов типа «меандр» стабильной амплитуды:

$$U_{\text{ФОН}}(t) = \pm E_0. \quad (1)$$

На выходе ОУ имеем:

$$U_{\text{ОУ}}(t < t_1) = \pm E_0 \left[C_3 / C'_0 - k_{\text{МП}}(n) C''_0 / C'_0 \right], \quad (2)$$

где C'_0 и C''_0 – значения емкости первого ОК1 и второго ОК2 опорных конденсаторов. Обычно берется $C'_0 = C''_0$, далее обозначим C_0 ; $k_{\text{МП}}(n)$ – коэффициент передачи МП, где n – номер такта компенсации.

После компенсации $U_{\text{ОУ}}(t = t_1) = 0$, КН отключается и $k_{\text{МП}}(n) = C_3 / C_0$. Напряжение на выходе МП определяет значение «геометрической» емкости СЗ $U_{\text{МП}} = \pm E_0 C_3 / C_0$.

Затем БЕД загружается исследуемым раствором или веществом и начинается процесс определения информативных параметров, который описывается следующими уравнениями.

Напряжение на выходе ОУ для каждого из полупериодов опорного воздействия имеет вид:

$$U_{\text{ОУ}}(t > t_1) = \pm E_0 \left[\frac{C_1 C_2}{C_0 (C_1 + C_2)} e^{-t/R_1(C_1 + C_2)} + \frac{C_1}{C_0} (1 - e^{-t/R_1(C_1 + C_2)}) \right]. \quad (3)$$

Перепад напряжений на выходе ОУ в момент смены знака опорного сигнала фиксируется вторым УВХ 2:

$$U_{\text{УВХ2}}(t > t_1) = \pm E_0 C_1 C_2 / C_0 (C_1 + C_2). \quad (4)$$

Первое устройство выборки и хранения УВХ1 фиксирует значение выходного напряжения ОУ в конце каждого полупериода $0,5T$ входного воздействия, которое определяется емкостью С1, обусловленной диэлектрическими свойствами изоляции:

$$U_{\text{УВХ1}}(t > t_1) = \pm E_0 C_1 / C_0. \quad (5)$$

Необходимая временная задержка обеспечивается ЭЗ:

$$t_3 = 0,5T > R_1 (C_1 + C_2)_{\text{max}}. \quad (6)$$

Период входного воздействия выбирается из условия $T \geq 12R_1 (C_1 + C_2)$. Это необходимо для практического завершения переходных процессов в каждом из полупериодов входного воздействия.

На выходе первого ЛП1 имеем:

$$U_{\text{ЛП1}}(t > t_1) = U_{\text{УВХ1}}(t > t_1) / U_{\text{УВХ2}}(t > t_1), \text{ т.о.} \\ U_{\text{ЛП1}}(t > t_1) = \pm E_0 (C_1 + C_2) / C_2 = \pm E_0 (1 + C_1 / C_2). \quad (7)$$

На выходе ВУ получаем напряжение, определяемое отношением емкостей С1 и С2.

$$U_{\text{ВУ}}(t > t_1) = U_{\text{ЛП1}}(t > t_1) - U_{\text{ФОН}}(t), \text{ т.о.}$$

$$U_{\text{ВУ}}(t > t_1) = \pm E_0 C_1 / C_2. \quad (8)$$

Для определения значения емкости С2, обусловленной полярными свойствами исследуемого раствора или вещества используется второй логарифмический преобразователь ЛП 2:

$$U_{\text{ЛП2}}(t > t_1) = U_{\text{УВХ1}}(t > t_1) / U_{\text{ВУ}}(t > t_1), \\ U_{\text{ЛП2}}(t > t_1) = \pm E_0 C_2 / C_0. \quad (9)$$

Наиболее сложным является определение значения активного сопротивления R1. Для решения этой задачи в схему введен Д, в котором на время импульса с выхода ОВ реализуется нулевой коэффициент передачи. В результате на выходе Д получаем:

$$U_{\text{Д}}(t > t_1 + t_{\text{ОВ}}) = \pm E_0 \tau_{\text{Д}} C_1 / C_0 R_1 (C_1 + C_2) \cdot e^{-t/R_1(C_1 + C_2)}, \quad (10)$$

где $\tau_{\text{Д}}$ – постоянная времени Д.

На выходе третьего УВХ 3 получаем:

$$U_{УВХ3}(t > t_1) = \pm E_0 \tau_d C_1 / C_0 R_1 (C_1 + C_2). \quad (11)$$

На выходе третьего ЛП 3 имеем сигнал, равный отношению напряжений на выходах второго УВХ 2 и третьего УВХ 3:

$$U_{ЛП3}(t > t_1) = U_{УВХ2}(t > t_1) / U_{УВХ3}(t > t_1), \\ U_{ЛП3}(t > t_1) = \pm E_0 R_1 C_2 / \tau_d. \quad (12)$$

На выходе четвертого ЛП 4 получаем сигнал, равный отношению напряжений на выходах ЛП2 и ЛП3, определяющий значение активного сопротивления R1:

$$U_{ЛП4}(t > t_1) = U_{ЛП3}(t > t_1) / U_{ЛП2}(t > t_1), \\ U_{ЛП4}(t > t_1) = \pm E_0 R_1 C_0 / \tau_d. \quad (13)$$

Сигналы с выходов УВХ1, ЛП2 и ЛП4 поступают на входы прецизионных выпрямителей В1, В2 и В3 соответственно, а затем на входы аналого-цифровых преобразователей.

Одновибратор, элемент задержки, дифференциатор, узлы выборки и хранения, прецизионные выпрямители выполнены по типовым схемам на дифференциальных усилителях 140УД20, логотрические преобразователи – на микросхемах аналоговых перемножителей сигналов типа 525ПС3, включенных в режиме деления напряжений. Это обеспечивает требуемую точность преобразования и быстродействие при сравнительно простой реализации.

Экспериментальные исследования проводились с использованием двухпараметрового цифрового влагомера зерна, разработанного в Пензенском государственном университете, который был предварительно аттестован по образцовой установке определения влажности зерна УВТ-1 [11].

Несомненным достоинством рассмотренного унифицирующего преобразователя являются широкие функциональные возможности. Как показано в работах [14,15] для измерения влажности в широких диапазонах на сортирующих линиях осуществляется предварительный контроль процесса сушки в диапазоне до 15% и выше. Контроль влажности в процессе окончательной сушки осуществляется с помощью диэлькометрического преобразователя. В рассматриваемом случае можно обойтись одним преобразователем. На первом этапе используется информация о сопротивлении R1 (выход выпрямителя В3), на втором – информация о емкости C2 (выпрямитель В2). Перспективной так же является возможность уменьшения дополнительных (температурных) погрешностей путем использования избыточной информации об изменении неинформативных в данном опыте параметрах датчика – коррекция погрешности инвариантности устройств измерения неэлектрических величин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мамикочян Б.М., Авитесян А.Р. Методы и средства измерения влажности древесины / Мамикочян Б.М., // Вестник гос. Инженерного ун-та Армении. Серия «Электротехника и энергетика». – Ереван, 2012. Вып. №2 (15). С. 9–27.
2. Берлинер М.А. Измерение влажности. М.: Энергия, 1973. 400 с.
3. Измерения в промышленности: Справ. изд. в 3-х кн. Кн.3. Способы измерения и аппаратура: Пер с нем. [под ред. Профоса П.]. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1990. 344 с.
4. Савосин С.И. Автоматизация контроля влажности зерна и воздуха при его хранении. / Савосин С.И., Солдатов В.В // Вестник ФГОУ ВПО «МАГУ им. В.П. Горячкина». Агроинженерия. 2008. Вып. №3 (28). С. 28–30.
5. Шведов С.Н. Метод и средства двухпараметрового контроля влажности материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. 05.11.13. Орел: Орловский ГТУ, 2010. 18 с.
6. Савосин С.И. Интеллектуальная система контроля влажности и температуры воздуха в теплице: автореф. дис. ... канд. техн. наук. 05.13.06. Москва: РГАЗУ, 2010. 18 с.
7. Мишков М.Ю. Разработка диэлькометрических измерительных преобразователей для систем экологического мониторинга пресноводных сред: автореф. дис. ... канд. техн. наук. 05.11.13. Ижевск: ИПМ УрОРАН, 2009. 24 с.
8. Подкин Ю. Г. Теоретические основы диэлькометрического контроля неравновесных дисперсных систем. М.: Научтехлитиздат, 2003. 158 с.
9. Емкостные датчики и лабораторные влагомеры зерна и зернопродуктов / Джапаридзе Т.Д., Шаламберидзе Э.Д., Месхидзе Р.Н. и др. М.: ЦНИИТЭИ ВНПО «Зернопродукт». Серия: Элеваторная промышленность. 1990. 36 с.
10. Основы инвариантного преобразования параметров электрических цепей / А.И. Мартяшин, К.Л. Куликовский, С.К. Куроедов, Л.В. Орлова [под ред. А.И. Мартяшина]. М.: Энергоатомиздат, 1990. 216 с.
11. Машошин П.В. Преобразователи параметров емкостных датчиков для измерения влажности сыпучих веществ: автореф. дис. ... канд. техн. наук. 05.11.01. Пенза: ПензГУ, 2003. 21 с.
12. Патент РФ №2483313, 27.05.2013.
13. Чураков П.П., Свистунов Б.Л. Измерители параметров катушек индуктивности. Пенза: изд-во ПензГУ, 1998. 180 с.
14. Леонов Л.В., Чубаров Е.П., Савосин С.И. Комбинирование кондуктометрического и диэлькометрического методов измерения влажности древесных материалов // Лесной вестник. М.: из-во МГУЛ, 2000. №4. С.109–112.
15. Савосин С.И. Новые возможности кондуктометрического метода контроля влажности древесных материалов // Датчики и системы. 2005. №10.

С.44–46.
16. Арбузов В.П. Квазиуравновешенные измерительные цепи датчиков с комплексной схемой за-

мещения параметрического преобразователя // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2006. № 6. С. 253–262.

THE TRANSMITTER PARAMETERS OF CONTACTLESS CAPACITIVE SENSORS INTENDED FOR CONDUCT-DIELCOMETRIC MEASUREMENTS

© 2016 A.V. Grachev, P.P. Churakov

Penza State University

Four-element electrical equivalent circuit of a contactless capacitive sensor transmitter parameters for conduct-dielcometric measurement of non-electrical quantities are consider in this article. The transformation equations for each of parameters and recommendations about practical implementation are present. Advantages of the Converter are wide functionality and correction of additional errors.

Keywords: contactless capacitor sensor, conduct-dielcometric measurements, functionality and error of transformation, parameters of equivalent electrical replacement circuit.

Petr Churakov, Doctor of Technical Sciences, Professor at the "Information and Measuring Equipment and Metrology Department, the Head of a Regional Training «National Instruments Technology Center", a Member of Dissertation Councils at the Penza State University and Voronezh State Technical University; Member of the Expert Council of Russian Federation VAK on Electronics, Measurement Technology, Radio Engineering and Communications.

E-mail: churakov.pp@gmail.com

Andrey Grachev, Head of Technical Means Education Department. E-mail: andean@mail.ru