

УДК 681.586.722

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ЕМКОСТНОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

В. А. КАРПОВ, В. А. ХАНАНОВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

Емкостные датчики применяются для измерения большого количества разнообразных технологических величин, таких, как перемещение, приближение, влажность, ускорение, уровень жидкости, концентрация газов и др. [1], [2]. В зависимости от измеряемого параметра меняется конструктивное исполнение емкостных чувствительных элементов, что вызывает необходимость разрабатывать отдельный измерительный преобразователь [3]. В данной работе предложен метод построения универсального измерительного преобразователя для дифференциальных емкостных чувствительных элементов.

Универсальная схема для дифференциального емкостного чувствительного элемента

Предложенная схема основана на структуре «интегратор–дифференциатор», представленной в [4], которая обладает следующими преимуществами:

– ЕЧЭ включается в схему потенциально токовым методом, что позволяет устранить влияние паразитных емкостей на результат измерения [5];

– гибкая структура «интегратор–дифференциатор» позволяет реализовать различные алгоритмы преобразования для дифференциальных емкостных чувствительных элементов (ЕЧЭ), например [6]:

$$y(x) = \frac{C_2(x)}{C_1(x)}; \quad (1)$$

$$y(x) = 1 - \frac{C_2(x)}{C_1(x)}; \quad (2)$$

$$y(x) = \frac{C_1(x) - C_2(x)}{C_1(x) + C_2(x)}; \quad (3)$$

– предлагаемая структура позволяет подключать дополнительные блоки, например, термозависимый конденсатор для корректировки погрешности, вызванной различной температурой плеч ЕЧЭ или их различными температурными коэффициентами.

Алгоритм преобразования (1) применяется для преобразования емкостей полудифференциальных (квазидифференциальных) датчиков. В таких чувствительных элементах только одна из емкостей $C_1(x)$ или $C_2(x)$ зависит от измеряемой величины, в то время как вторая емкость предназначена для осуществления логометриче-

ской коррекции влияния дестабилизирующих факторов (температурного расширения электродов, влияния влажности воздуха и т. п.) Например, пусть имеется плоскопараллельный ЕЧЭ (рис. 1) с переменным расстоянием d между пластинами, где электроды 1 и 2 образуют переменный конденсатор $C_1(x)$, а электроды 2 и 3 – опорный конденсатор C_2 .

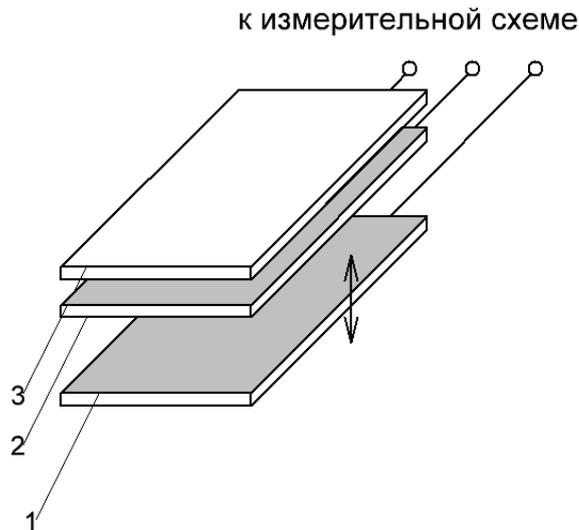


Рис. 1. Плоскопараллельный квазидифференциальный ЕЧЭ

Обозначим аддитивную температурную погрешность γ_t , а γ_h – аддитивную погрешность, вызванную изменением влажности воздуха. Так как электроды ЕЧЭ расположены в одном корпусе, внешние факторы оказывают на них одинаковое воздействие. Применим преобразование (1) к ЕЧЭ (рис. 1):

$$U_{\text{вых}} = \frac{C_2(1+\gamma_t)(1+\gamma_h)}{C_1(x)(1+\gamma_t)(1+\gamma_h)} = \frac{\frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d_0}}{\frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d(x)}} = \frac{d(x)}{d_0}.$$

Принимая за искомую величину отношение $U_{\text{вых}} = d(x)/d_0 = x$, получим результат, не зависящий от влияния условий внешней среды.

В ряде случаев, из-за конструктивных особенностей ЕЧЭ применяют алгоритм (2) [7]. Он осуществляет логометрическую коррекцию аналогично алгоритму (1).

Алгоритм преобразования (3) используется в полностью дифференциальных емкостных датчиках для получения ратиометрического выходного сигнала. Как было показано в [4], применение выражения (3) также позволяет осуществить логометрическую коррекцию погрешностей, вызванных действием окружающей среды.

На рис. 2 представлена схема универсального измерительного преобразователя (ИП) для дифференциального ЕЧЭ, где Г, Инв., И и Д – соответственно генератор, инвертор, интегратор и дифференциатор переменного напряжения. В предложенном ИП реализуемый алгоритм задается путем замыкания/размыкания переключателей $П_1$ и $П_2$.

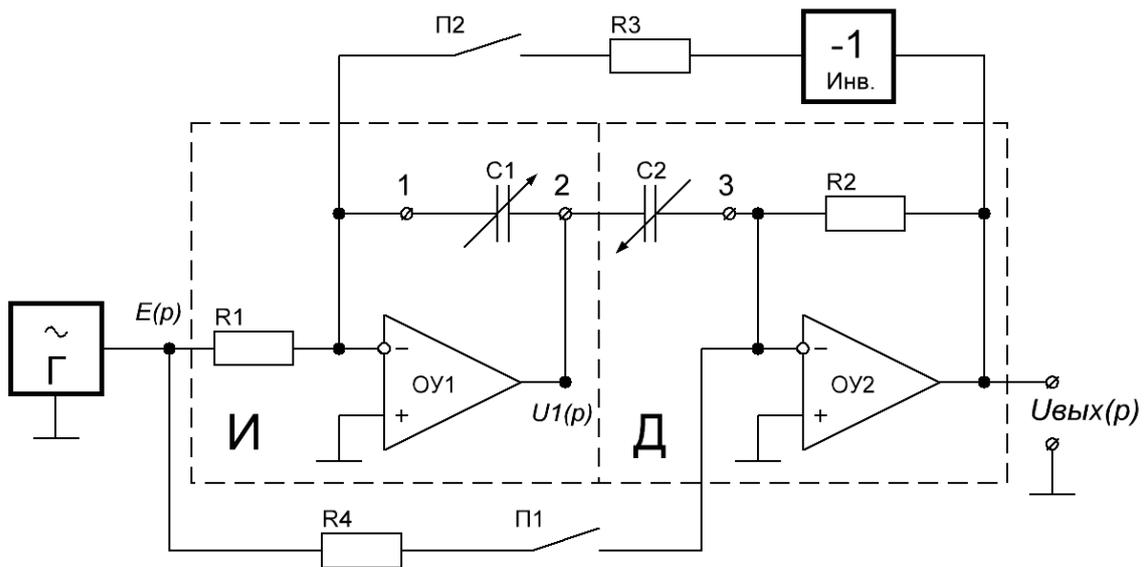


Рис. 2. Функциональная схема универсального ИП для дифференциального ЕЧЭ

При размыкании переключателей Π_1 и Π_2 преобразователь представляет собой каскадное соединение интегратора и дифференциатора. Определим выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ данной схемы, для этого запишем следующие выражения в операторном виде:

$$U_1(p) = -E(p) \frac{1}{pC_1R_1}; \tag{4}$$

$$U_{\text{вых}}(p) = -U_1(p)pC_2R_2. \tag{5}$$

Подставим (4) в (5) и получим:

$$U_{\text{вых}}(p) = E(p) \frac{pC_2R_2}{pC_1R_1} = E(p) \frac{R_2}{R_1} \frac{C_2}{C_1},$$

где $R_2/R_1 = K$ – коэффициент усиления преобразователя.

Таким образом, данная схема реализует алгоритм (1).

Вычислим выходное напряжение схемы, образованной при замыкании переключки Π_1 . Выражение (5) преобразуется следующим образом:

$$U_{\text{вых}}(p) = -U_1(p)pC_2R_2 - E(p) \frac{R_2}{R_4}.$$

Подставим выражение (4) в полученное уравнение, при этом примем $R_1 = R_4$:

$$U_{\text{вых}}(p) = E(p) \left(\frac{C_2R_2}{C_1R_1} - \frac{R_2}{R_4} \right) = E(p) \cdot \frac{R_2}{R_1} \left(\frac{C_2}{C_1} - 1 \right),$$

где $R_2/R_1 = K$ – коэффициент усиления преобразователя.

Таким образом, данная схема реализует алгоритм (2).

Вычислим выходное напряжение схемы при замкнутых переключках Π_1 и Π_2 [4]:

$$U_1(p) = -E(p) \frac{1}{pC_1R_1} + U_{\text{вых}}(p) \frac{1}{pC_1R_3};$$

$$U_{\text{вых}}(p) = -E(p) \frac{R_2}{R_4} - U_1(p) pC_2R_2.$$

Выразим $U_{\text{вых}}(p)$ и $U_1(p)$ из уравнений:

$$U_1(p) = -E(p) \frac{R_1R_2 + R_3R_4}{p(C_1R_3 + C_2R_2)R_1R_4};$$

$$U_{\text{вых}}(p) = -E(p) \frac{R_2R_3}{R_1R_4} \frac{C_1R_1 - C_2R_4}{C_1R_3 + C_2R_2}.$$

Выходное напряжение при $R_2 = R_4$ и $R_2 = R_3$ равно:

$$U_{\text{вых}}(p) = E(p) \frac{R_2}{R_1} \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2}.$$

Данное выражение соответствует алгоритму (3). Таким образом, с помощью введения в структуру различных обратных связей, можно получить любую требуемую функцию преобразования.

Коррекция температурной погрешности

Если конденсаторы C_1 и C_2 подвержены одинаковым внешним воздействиям (что обеспечивается расположением емкостей ЕЧЭ в одном корпусе), то применение алгоритмов преобразования (1)–(3) позволяет осуществить логометрическую коррекцию температурной погрешности благодаря равенству температурных коэффициентов емкостей чувствительного элемента. В ряде случаев такая коррекция невозможна [8]:

- при температуре ЕЧЭ свыше 200 °С;
- при разных температурных коэффициентах;
- при различной температуре емкостей C_1 и C_2 .

Для осуществления такой коррекции необходимо к выходному сигналу добавлять выходное термозависимое корректирующее воздействие. Оптимально с этой целью использовать дополнительный термозависимый конденсатор. Схема замещения дифференциального ЕЧЭ с термозависимым конденсатором представлена на рис. 3, а.

Использование общего провода упрощает кабель, но приводит к усложнению измерительной схемы.

Для осуществления наиболее распространенного алгоритма коррекции температуры (1) выходная функция преобразователя должна иметь следующий вид:

$$U_{\text{вых}}(p) = \frac{C_2(x) - \alpha C_t(t)}{C_1(x) - \beta C_t(t)}, \quad (6)$$

где α и β – коэффициенты передач, предназначенные для настройки блока коррекции.

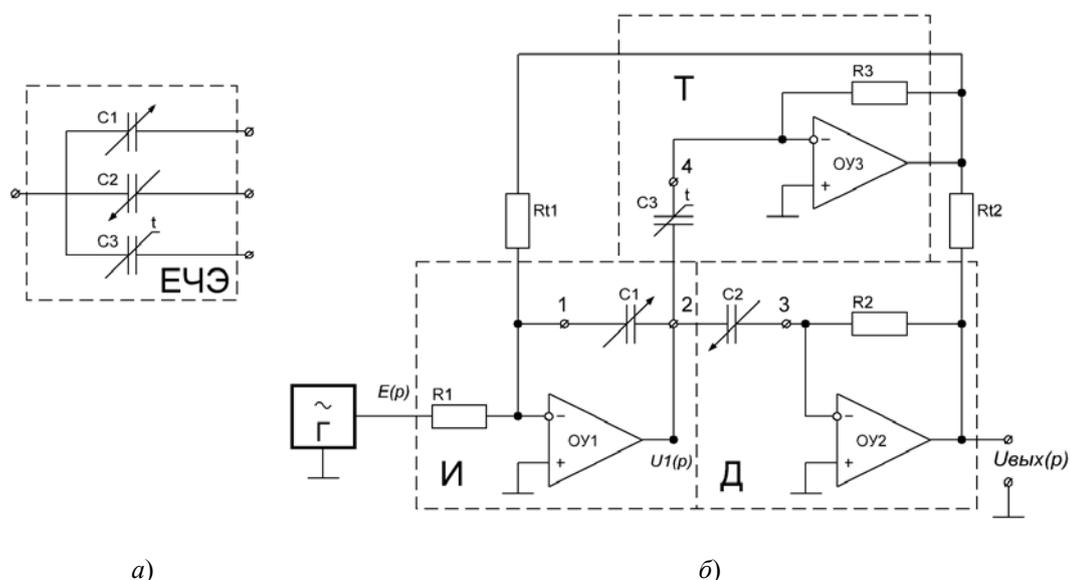


Рис. 3. Коррекция температурной погрешности:
 а – схема замещения дифференциального ЕЧЭ с термозависимым конденсатором;
 б – структурная схема ИП с коррекцией температурной погрешности

На рис. 3, б изображена структурная схема ИП с коррекцией температурной погрешности, построенной на структуре «интегратор–дифференциатор», где T – блок температурной погрешности. Коррекция погрешности осуществляется по мгновенным значениям в цепи переменного тока, что позволяет добиться высокого быстродействия, а включение всех емкостей потенциально токовым методом позволяет устранить влияние паразитной емкости соединительного кабеля.

Выходная функция ИП, представленного на рис. 3, б, при $R_1 = R_2 = R_3 = R$ имеет следующий вид:

$$U_{\text{вых}}(p) = E(p) \frac{C_2 - \frac{R}{R_{t1}} C_t}{C_1 - \frac{R}{R_{t2}} C_t}.$$

Настройка блока коррекции осуществляется путем изменения сопротивлений R_{t1} и R_{t2} .

Испытания опытного образца

Для проверки метрологических характеристик предложенного ИП был реализован макет (рис. 1). В качестве опытной установки использовались микросхемы TL071AC, в качестве сопротивлений – резисторы типа С2-29В с допуском 0,1 %. Для имитации ЕЧЭ использовались два образцовых конденсатора типа Р554 с начальной емкостью 20 пФ и дополнительной 0...60 пФ с точностью установки электрической емкости 0,5 %. В качестве генератора использовался генератор синусоидальной формы Г3-118. Амплитуда колебаний – 1 В. Рабочая частота выбиралась из условия равенства модулей сопротивлений резистора R_1 и емкости C_1 :

$$\omega = \frac{1}{R_1 C_1}.$$

При выборе сопротивления $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 100$ кОм и начальном значении $C_1 = 20$ пФ рабочая частота устанавливалась равной 80 кГц.

Значения напряжений измерялись вольтметром В7-38 (класс точности – 0,5 %). Значения емкостей C_1 и C_2 задавались в интервале 20...80 пФ. В результате эксперимента выяснилось, что относительная погрешность не превышала 1 %, что находится на уровне используемых метрологических средств измерений. ИП чувствителен к изменению емкости ЕЧЭ от 0,1 до 300 пФ, что позволяет его применять для широкого круга промышленных задач.

В работе [9] рассматривался ИП, в котором $E(p)$ представлял собой сигнал прямоугольной формы. Преобразователь продемонстрировал достаточную точность преобразования (погрешность не превышала величины 5 % на всем температурном диапазоне и была вызвана температурным дрейфом генератора) и возможность его сопряжения с управляющей микропроцессорной системой. Возможность работы с сигналом генератора прямоугольной формы позволяет интегрировать предложенную структуру в состав интеллектуальных датчиков, основанных на однокристалльных микроконтроллерах.

Заключение

В ходе проделанной работы был разработан универсальный измерительный преобразователь для дифференциального емкостного чувствительного элемента. Предложенная схема отличается от существующих решений простотой реализации основных алгоритмов преобразования. Исследования опытного образца показали, что относительная погрешность измерений не превышает 1 %.

Литература

1. Сысоева, С. Н. Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы / С. Н. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2006. – № 4. – С. 16–30.
2. Фрайден, Дж. Современные датчики : справочник / Дж. Фрайден. – М. : Техносфера, 2005. – 592 с.
3. Baxter, Larry K. Capacitive Sensors: Design and Applications / Larry K. Baxter. – IEEE Pres., 1997.
4. Карпов, В. А. Измерительный преобразователь для дифференциального емкостного чувствительного элемента с ратиметрическим выходным сигналом / В. А. Карпов, В. А. Хананов // Вестн. Гомел. гос. ун-та им. П. О. Сухого. – 2013. – № 3. – С. 58–63.
5. Гриневич, Ф. Б. Измерительные компенсационно-мостовые устройства с емкостными датчиками / Ф. Б. Гриневич, А. И. Новик. – Киев : Наук. думка, 1987. – 112 с.
6. Кудряшов, Э. А. Сравнительный анализ алгоритмов работы емкостных преобразователей / Э. А. Кудряшов // Датчики и системы. – 2001. – № 7. – С. 10–15.
7. Арбузов, В. П. Бесконтактный датчик толщины диэлектрических материалов / В. П. Арбузов // Датчики и системы. – 2013. – № 1. – С. 44–46.
8. Арбузов, В. П. Коррекция температурной погрешности емкостных измерительных цепей / В. П. Арбузов // Датчики и системы. – 2007. – № 4. – С. 39–42.
9. Хананов, В. А. Емкостной датчик уровня солевого раствора / В. А. Карпов, В. А. Хананов // Электроника инфо. – 2013. – № 10. – С. 47–50.