

УДК 681.586.72

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ЕМКОСТНОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА С РАТИОМЕТРИЧЕСКИМ ВЫХОДНЫМ СИГНАЛОМ

В. А. КАРПОВ, В. А. ХАНАНОВ

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

Введение

Благодаря простоте конструкции, низкой стоимости и ясности принципа действия емкостные чувствительные элементы нашли широкое распространение при преобразовании таких физических величин, как давление, ускорение, угловые и линейные перемещения, уровень, расход влажность и др. В последние годы с появлением MEMS [1] технологии применение емкостных чувствительных элементов выросло многократно. При этом чувствительные элементы реализованы в дифференциальном включении.

Дифференциальный чувствительный элемент

Электрическая схема дифференциального чувствительного элемента (ДЧЭ) [1] представлена на рис. 1, а. При этом значения емкостей C_1 и C_2 изменяются следующим образом:

$$C_1 = C_0 \pm \Delta C;$$

$$C_2 = C_0 \mp \Delta C.$$

В качестве информативного параметра X ДЧЭ ищется сигнал пропорциональный отношению разности емкостей датчика к его сумме:

$$X \equiv \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} = \frac{\Delta C}{C_0}.$$

Такое представление информативного параметра называется ратиометрическим, т. е. выходной сигнал измерительного преобразователя для ДЧЭ должен иметь ратиометрический выход (рис. 1, б).

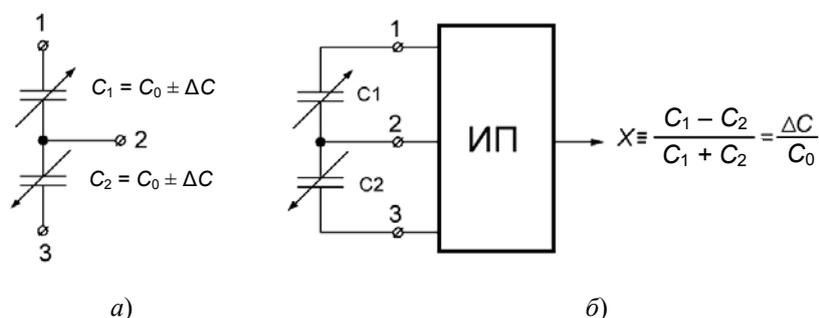


Рис. 1. Электрическая схема ДЧЭ:
а – общий вид; б – измерительный преобразователь для ДЧЭ

Такой подход в формировании выходного сигнала позволяет существенно снизить температурные погрешности, повысить линейность и динамический диапазон преобразования. Кроме того, он позволяет обеспечить линейность преобразования в независимости от того, на какой параметр чувствительного элемента воздействует физическая величина. Действительно, пусть C_0 имеет вид:

$$C_0 = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S_0}{d_0}.$$

Тогда изменение электрической емкости ΔC под воздействие физической величины можно представить следующим образом:

$$\Delta C = \frac{\partial C_0}{\partial S} \Delta S + \frac{\partial C_0}{\partial d} \Delta d + \frac{\partial C_0}{\partial \varepsilon} \Delta \varepsilon$$

или

$$\Delta C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{d_0} \Delta S + \frac{\varepsilon_0 S_0}{d_0} \Delta \varepsilon - \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S_0}{d_0^2} \Delta d.$$

Относительное изменение $\Delta C/C_0$ или ратиометрический параметр имеет вид:

$$X = \frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta S}{S_0} + \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_0} - \frac{\Delta d}{d_0}.$$

Откуда видно, что информативный параметр X пропорционален относительному изменению трех параметров ДЧЭ, на которые может воздействовать преобразуемая величина (S_0 , ε , d_0).

Обзор существующих измерительных преобразователей

Известны измерительные преобразователи (ИП) для ДЧЭ с выходным ратиометрическим сигналом [2], [3] выполненные в виде моста с электронным отношением плеч E , $-E$ (рис. 2, *a*), ДЧЭ и повторителя напряжения на основе операционного усилителя (ОУ). Однако данный ИП обладает дополнительными конструктивными сложностями. Дело в том, что емкостные ЧЭ имеют значительные паразитные емкости 10–20 пФ, на рабочих частотах $f > 50$ кГц их сопротивление находится на уровне 1–100 МОм, т. е. это высокоомные элементы, подверженные влиянию помех. Для предотвращения этого влияния цепи, соединяющие электроды 1, 2, 3 ДЧЭ и ИП, помещают в заземленный электростатический экран. Однако электрод 2 (рис. 2, *a*) нагружен на высокоомный вход повторителя, поэтому простое экранирование не помогает. Для обеспечения приемлемой помехоустойчивости используется дополнительный экран. Наружный экран заземляется, внутренний же экран с помощью повторителя находится под потенциалом среднего электрода 2 ДЧЭ. Таким образом, паразитная емкость не влияет на выходной сигнал, так как на ней отсутствует падение напряжения. Отмеченным обстоятельством объясняется известная конструктивная сложность данного ИП, особенно при значительном удалении ДЧЭ от ИП.

На рис. 2, *б* представлен ИП с виртуально заземленным средним электродом [3]. В данном случае двойное экранирование не требуется. Но выходной параметр преобразования ИП не является ратиометрическим, а пропорционален разности емкостей ДЧЭ.

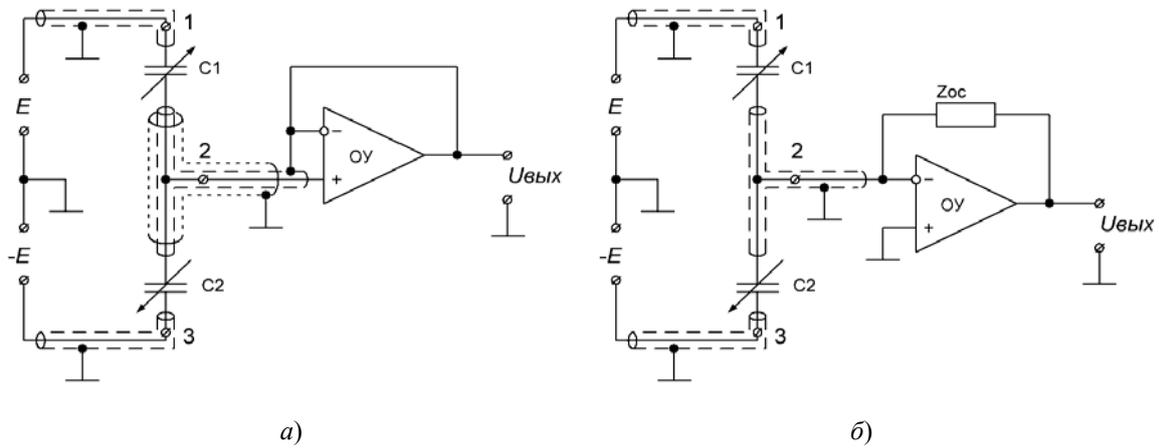


Рис. 2. Измерительные преобразователи для ДЧЭ:
 а – с ратиометрическим выходом; б – с виртуально заземленным средним электродом

Известны ИП с временной или структурной избыточностью [4], в которых средний электрод виртуально заземлен (аналог схемы – рис. 2, а). Для формирования ратиометрического информативного параметра в ИП вводится логометрическое устройство, вычисляющее отношение, что также ведет за собой дополнительное конструктивное усложнение.

Измерительный преобразователь на основе интегратора и дифференциатора

В данной работе предлагается ИП для ДЧЭ, функциональная схема которого представлена на рис. 3, где Г, Инв., И и Д, соответственно, генератор, инвертор, интегратор и дифференциатор переменного напряжения.

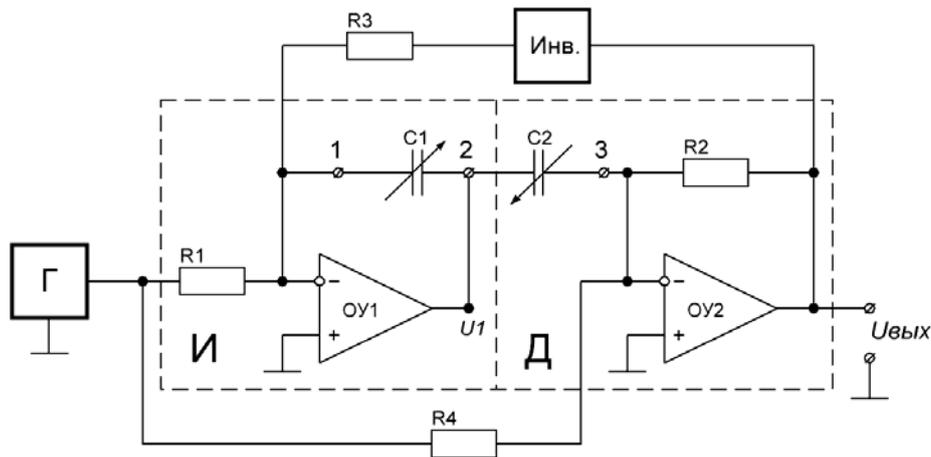


Рис. 3. Функциональная схема ратиометрического ИП на основе интегратора и дифференциатора

Рабочие емкости C_1 и C_2 ДЧЭ с использованием ОУ1 и ОУ2 реализует соответственно интегратор (с резисторами R_1, R_3) и дифференциатор (с резистором R_2). Для данной схемы в операторном виде можно записать следующие выражения:

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

$$U_{\text{ВЫХ}}(p) = -E(p) \frac{R_2}{R_4} - U_1(p) pC_2R_2. \quad (2)$$

Выразим $U_{\text{ВЫХ}}(p)$ и $U_1(p)$ из уравнений (1) и (2):

$$U_1(p) = -E(p) \frac{R_1 R_2 + R_3 R_4}{p(C_1 R_3 + C_2 R_2) R_1 R_4};$$

$$U_{\text{ВЫХ}}(p) = -E(p) \frac{R_2 R_3}{R_1 R_4} \cdot \frac{C_1 R_1 - C_2 R_4}{C_1 R_3 + C_2 R_2}. \quad (3)$$

Обеспечивая, например, в выражении (3) равенства $R_1 = R_4 = r_1$, $R_3 = R_2 = r_2$, окончательно можно получить выходное напряжение в ратиометрической форме:

$$U_{\text{ВЫХ}}(p) = E(p) \frac{r_2}{r_1} \cdot \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2}.$$

Отношением r_2/r_1 характеризуется коэффициент усиления. Из рис. 3 видно, что электроды 1 и 3 ДЧЭ виртуально заземлены, а средний электрод подключен к низкоомному выходу интегратора. Включение датчика – потенциально-токовое. Как известно, при таком включении на результат преобразования не влияют паразитные емкости электродов датчика [5], что является еще одним преимуществом данного ИП по сравнению с рассмотренными выше. Следует отметить, что в данном ИП выходной сигнал не зависит от частоты генератора ω , что также является достоинством.

Исследования опытного образца

Для проверки метрологических характеристик предложенного ИП был реализован макет. В качестве ОУ использовались микросхемы TL071AC, в качестве сопротивлений – резисторы типа С2-29В с допуском 0,1 %. Для имитации ДЧЭ 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 ГЗ-118. Рабочая частота устанавливалась равной 10 кГц. Амплитуда колебаний – 1 В. Значения напряжений измерялись вольтметром В7-38 (класс точности 0,5 %). Значение ΔC задавались в интервале –30–30 пФ. В результате эксперимента выяснилось, что относительная погрешность не превышала 1,5 %, что находится на уровне используемых метрологических средств измерения. При изменении частоты от 900 до 1100 Гц изменений выходного сигнала не наблюдалось.

Заключение

В ходе проделанной работы был разработан измерительный преобразователь с ратиометрическим выходным сигналом для дифференциального емкостного чувствительного элемента. Предложенная схема отличается от существующих решений структурной простотой и нечувствительностью к паразитным емкостям. Исследования опытного образца показали, что относительная погрешность измерений не превышает 1,5 %.

Литература

1. Сысоева, С. Н. Автомобильные акселерометры. Ч. 4. Развитие технологии и элементной базы емкостных акселерометров / С. Н. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2006. – № 3. – С. 10–17.
2. Распопов, В. Я. Лекция 8. Измерительные цепи и передаточные функции акселерометров прямого преобразования / В. Я. Распопов // Датчики и системы. – 2006. – № 5. – С. 30–33.

3. Левшина, Е. С. Электрические измерения физических величин / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий. – Л. : Энергоатомиздат, 1987. – 320 с.
4. Арбузов, В. П. Структурные методы повышения точности измерительных цепей емкостных и индуктивных датчиков : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.11.01 / В. П. Арбузов ; Пенз. гос. ун-т. – Пенза, 2009. – 43 с.
5. Гриневич, Ф. Б. Измерительные компенсационно-мостовые устройства с емкостными датчиками / Ф. Б. Гриневич, А. И. Новик. – К. : Наук. думка, 1987. – 112 с.

Получено 17.05.2013 г.