

7. ГОСТ Р 55136-2012/IEC/TS 60034-25:2007 Машины электрические вращающиеся. Часть 25. Руководство по конструкции и характеристикам машин переменного тока, специально предназначенных для питания от преобразователей. — М. : Стандартинформ, 2014. 62 с.

8. Коробцов А.А. применение эмалированных проводов в обмотках асинхронных двигателей с частотным управлением / А.А. Коробцов, А.П. Леонов, Ю.П. Похолков, Е.Ю. Солдатенко, А.И. Кочетков // Кабели и провода, 2013. – № 3 (340). – С. 16 – 18.

УДК 681.5.017; 681.5.03.23.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЙ

**А.В. Соколов**

Инспектор РГСН, Пенза, Россия, e-mail: [sokolov\\_av\\_avto@mail.ru](mailto:sokolov_av_avto@mail.ru)

**Аннотация.** Чувствительные элементы (ЧЭ) и измерительные модули (ИМ) в датчиках физических величин является основными конструктивными и функциональными узлами, определяющими большинство метрологических характеристик датчиков: точность измерения, метрологическую надежность и информативность. В связи с этим, ЧЭ и ИМ подвергаются моделированию, расчету и испытаниям на всех этапах разработки измерительного канала. В статье рассмотрены вопросы моделирования ЧЭ квазидифференциального типа, используемых в емкостных датчиках давлений (ЕДД).

*Ключевые слова:* емкость, чувствительный элемент, модель, датчик, квазидифференциальный.

## MODELING OF THE METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE SENSITIVE ELEMENTS OF CAPACITIVE PRESSURE SENSORS

**A.V. Sokolov**

Inspector RSCS, Penza, Russia, e-mail: [sokolov\\_av\\_avto@mail.ru](mailto:sokolov_av_avto@mail.ru)

**Abstract.** Sensitive elements (CE) and measuring modules (MI) in the sensors of physical quantities are the main structural and functional units that determine most of the metrological characteristics of the sensors: measurement accuracy, metrological reliability and information content. In this regard, CHE and IM are subjected to modeling, calculation and testing at all stages of the development of the measuring channel. In the article the questions of modeling Jae quasidifferentiable type used in a capacitive pressure sensor (EDD).

*Keywords:* capacity, sensor, model, sensor, quasidifferential.

**Введение.** Из большого разнообразия датчиков физических величин, ЕДД отличаются высокими техническими характеристиками: временной

стабильностью, сверхмалым энергопотреблением, стойкостью к агрессивным средам и проч. [1]. При создании большинства конструкций ЕДД преимущественное распространение на практике нашли дифференциальные конструкции емкостных чувствительных элементов (ЕЧЭ) с изменением зазора между электродами, представляющие по своей конструктивной сущности емкостные преобразователи микроперемещений. Рассмотрим более подробно данный тип конструктивного исполнения ЕЧЭ.

**Цель работы** рассмотреть вопросы моделирования ЧЭ квазидифференциального типа, используемых в емкостных датчиках давлений.

**Материал и результаты исследований.** Известно, что в целях достижения высокой линейности и точности функция преобразования ЕЧЭ перемещения в виде дифференциального плоскопараллельного конденсатора (рисунок 1,а) должна представляться следующим выражением [2]:

$$y = k \cdot \left( \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \right), \quad 1)$$

где  $k$  - коэффициент пропорциональности ( $k = const$ ),  $C_1$ ,  $C_2$  - емкости конденсаторов.

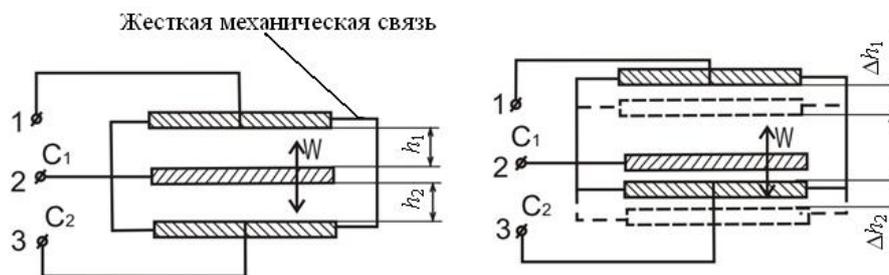


Рисунок 1 – Модель дифференциального емкостного преобразователя перемещения: а – исходное состояние; б-со смещением (паразитным) электродов

Покажем нерациональность дифференциальной конструкции ЕЧЭ с точки зрения принципиальной невозможности минимизации его аддитивной погрешности.

Емкости плоских конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  дифференциального ЕЧЭ (рисунок 1а) равны

$$C_1 = \frac{\varepsilon_1 S_1}{h_1}, \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{\varepsilon_2 S_2}{h_2} \quad (3)$$

где  $S_1, S_2$  - эффективные площади электродов конденсаторов;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  - диэлектрические проницаемости межэлектродной среды;  $h_1, h_2$  - расстояния между электродами конденсаторов.

Подставив в (1) выражения (2) и (3), при условии  $S_1 = S_2$  и  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ , функцию преобразования (1) можно выразить в более удобном для дальнейшего анализа виде:

$$y = k \cdot \left( \frac{h_2 - h_1}{h_1 + h_2} \right) \quad (4)$$

Предположим, что по какой-либо причине произойдет смещение нерабочего электрода 1 на величину  $\Delta h$  (рисунок 1,б). Поскольку в дифференциальных конструкциях ЕЧЭ электрод 1, как правило, жестко (механически) связан с электродом 3, то одновременно произойдет и смещение последнего на величину  $\Delta h$ . С учетом величины смещения  $\Delta h$ , функцию преобразования (4) можно представить в виде

$$y = k \cdot \frac{(h_2 - \Delta h) - (h_1 + \Delta h)}{(h_2 - \Delta h) + (h_1 + \Delta h)} = \left( y = k \cdot \frac{2\Delta h}{h_2 + h_1} \right) \quad (5)$$

Принимая во внимание, что в исходном состоянии выполняется условие  $h_1 = h_2 = h$ , получим приращение функции (5) в виде

$$|\Delta y| = k \cdot \frac{\Delta h}{h} \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что любое относительное паразитное смещение  $\Delta h$  электродов 1, 3 и 2 дифференциального ЕЧЭ неизбежно вызовет аддитивную погрешность преобразования, пропорциональную величине этого смещения. Это обстоятельство указывает на нерациональность проектирования прецизионных ЕДД на основе дифференциальных ЕЧЭ.

На рисунке 2,а представлена модифицированная модель квазидифференциального ЕЧЭ ЭДД.

Поясним, что под квазидифференциальной конструкцией, понимается конструкция ЕЧЭ, в котором имеются два конденсатора: один рабочий  $C_x$ , а другой опорный  $C_0$ . Причем последний, в целях обеспечения изоморфности с рабочим конденсатором к влияющим величинам, объединен с ним конструктивно и электрически в автокомпенсационную измерительную электрическую цепь (ИЭЦ) на базе операционного усилителя (ОУ), реализующую преобразование отношения емкостей [3, 4]:

$$y = k \cdot \frac{C_0}{C_x} \quad (7)$$

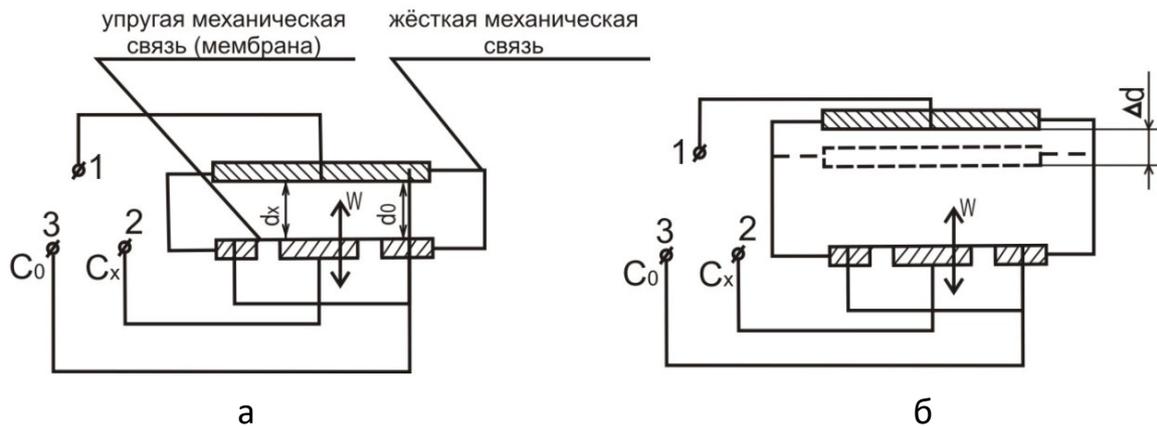


Рисунок 2 – Модель квазидифференциального ЕЧЭ с упругим элементом в виде мембраны с жестким центром: 1, 2 – круговые электроды, 3 – кольцевой электрод: а – исходное состояние; б – со смещением (паразитным) общего электрода 1

Аналогично рассмотрим влияние паразитного смещения  $\Delta h$  нерабочего общего электрода 1 квазидифференциального ЕЧЭ (рисунок 1,б) на погрешность преобразования.

Подставив величины  $C_0$  и  $C_x$ , выраженные через значения соответствующих им зазоров  $h_0$  и  $h_x$ , в выражение (7), получим функцию в виде:

$$y = k \cdot \frac{h_x}{h_0} \quad (8)$$

С учетом смещения электрода 1 на величину  $\Delta h$ , функция преобразования (8) будет иметь вид:

$$y = k \cdot \frac{h_x + \Delta h}{h_0 + \Delta h} = y \cdot \frac{\left(1 + \frac{\Delta h}{h_x}\right)}{\left(1 + \frac{\Delta h}{h_0}\right)} \quad (9)$$

При  $h_0 = h_x$ , что практически просто реализуется, смещение электрода 1 на  $\Delta h$ , не повлечет за собой приращения функции  $y = k \cdot \frac{h_x}{h_0}$ .

Отсюда следует, что аддитивная погрешность квазидифференциального ЕЧЭ в сочетании с ИЭЦ, реализующей преобразование отношения емкостей, теоретически близка к нулю. Это обстоятельство является исключительно важным, поскольку методы снижения аддитивной погрешности преобразователей давлений наиболее сложны.

На рисунке 3 показана другая модель квазидифференциального ЕЧЭ, отличающаяся типом упругого элемента в виде плоской мембраны, широко используемой в датчиках давления [5].

Нетрудно убедиться, что и для указанной конструкции ЕЧЭ справедливо выражение (9) и утверждение того, что аддитивная погрешность преобразования близка к нулю.

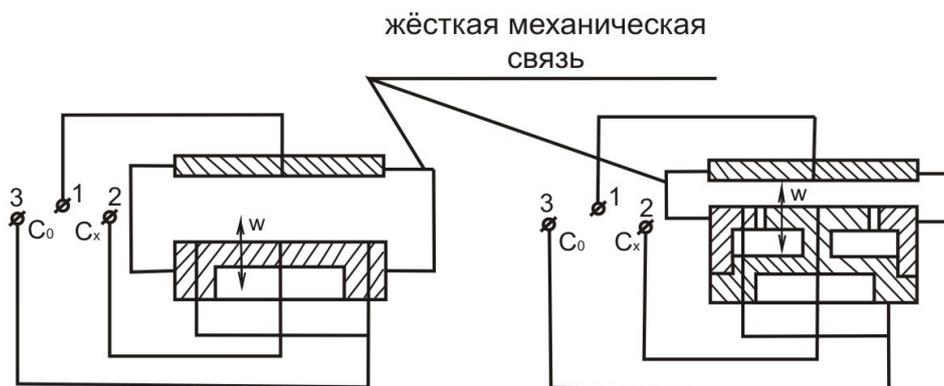


Рисунок 3 – Модель квазидифференциального ЕЧЭ: а) с упругим ЧЭ в виде плоской мембраны; б) с упругим ЧЭ в виде сложнопрофилированной мембраны с жёстким центром

На основании изложенного можно заключить, что квазидифференциальные ЕЧЭ, работающие в соответствии с функцией (7), являются более рациональными по сравнению с дифференциальными ЕЧЭ, работающими в соответствии с функцией (1). Кроме того, в новых конструкциях ЕЧЭ легко реализуется условие  $\frac{W}{l_1 + l_2} \rightarrow 1$  обеспечения малой погрешности преобразования, в том числе ее температурной составляющей.

Заметим также, что в дифференциальной конструкции ЕЧЭ, в целях достижения малой нелинейности функции преобразования, должна быть обеспечена идентичность гиперболических функций обеих его частей. Непросто добиться идентичности двух линейных функций, а добиться идентичности двух гиперболических функций при  $\frac{W}{h} \approx 1$  вообще трудно разрешимая задача. Поэтому в реальных дифференциальных емкостных датчиках модуляция рабочего зазора редко превышала 30% [6].

В заключение приведем реальную конструкцию емкостного датчика давления, который был разработан на основе методики и моделей, изложенных в данной статье.

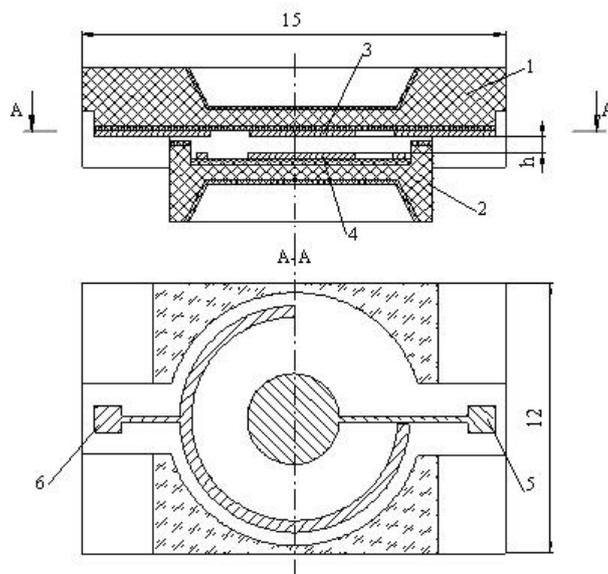


Рисунок 4 – Емкостный датчик малых давлений с квазидифференциальным кремниевым ЕЧЭ: 1-верхняя мембрана, 2-нижняя мембрана, 3, 4 – пленочные электроды, 5, 6 – контактные площадки

**Вывод.** Разработаны и проанализированы математические модели ЕЧЭ различных конструкций, доказано, что у ЕЧЭ, реализованных по квазидифференциальной конструктивной модели, точностные параметры выше, чем у иных конструктивных реализаций. Это позволяет рекомендовать их использование в прецизионных емкостных датчиках, предназначенных для применения в экстремальных условиях эксплуатации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Форейт И. Емкостные датчики неэлектрических величин / М. Л.: Энергия, 1966. - 160 с.
2. Горбунов С.Ф. Цыпин Б.В. Линеаризация градуировочных характеристик емкостных датчиков давления // Измерительная техника. - 2010. - №10. - С. 23 - 25.
3. Аш Ж. и др. Датчики измерительных систем / М.: Мир, 1992. - 480 с.
4. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. / М.: Техносфера, 2007. - 380 с.
5. Осадчий, Е.П. Проектирование датчиков для измерения механических величин / - М.: Машиностроение, 1979. - 480 с.
6. Ицкович, Э. Современные датчики и тенденции их развития //Электронные компоненты. - 2003. -№2. - С. 23 - 26.