

УДК 621.317

АНАЛИЗ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ДВУХОСЕВОГО ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ИНКЛИНОМЕТРА

В. А. КАРПОВ, О. М. РОСТОКИНА, А. В. КАРПОВ

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

Введение

В современной промышленности имеется потребность в измерении угла отклонений от горизонтали строительных конструкций, транспортных путей, крена автомобилей, кораблей, строительных кранов, экскаваторов, подъемников, измерении деформационного прогиба мостов, опорных балок и т.п. Для измерения этих углов используются устройства, называемые инклинометрами. Различаются эти устройства типом чувствительных элементов (ЧЭ). В настоящее время широкое распространение получили два типа чувствительных элементов. Это интегральные акселерометры [1]–[3] и электролитические сенсоры [3]–[6]. Первые являются функционально законченными интегральными элементами на основе МЭМС технологии, однако обладают значительным температурным дрейфом, для снижения которого применяется термокомпенсация и даже термостатирование [7]. Это ведет к потере чувствительности или усложнению инклинометра. Электролитические чувствительные элементы в меньшей степени подвержены влиянию температуры, что обуславливает их более высокую чувствительность (по крайней мере, на порядок), однако они требуют наличия измерительной схемы. В [5], [6], [8]–[10] представлены вопросы построения измерительных схем на основе электролитических датчиков. В [5] отражены вопросы построения измерительных схем, основанные на одновременном питании датчика суммой двух синусоидальных напряжений, отличающихся по частоте в два раза, с последующим разделением напряжений по осям. В [6] даны измерительные схемы, основанные на разновременном питании датчика прямоугольным напряжением типа меандр. В работе [8] проведены исследования влияния температуры окружающего воздуха на погрешность преобразования электролитического датчика. В [9], [10] проведен сравнительный анализ аналоговых и цифровых измерительных схем для электролитических датчиков. Из проделанного обзора видно, что вопросы анализа взаимного влияния осевых поворотов на погрешность преобразования, т. е. инструментальную погрешность, не достаточно освещены в научной литературе.

Целью данной работы является анализ взаимовлияния поворота электролитического чувствительного элемента на погрешность преобразования.

Постановка задачи

Анализ взаимовлияния проведем для типовой конструкции двухосевого электролитического чувствительного элемента, представленной на рис. 1, *a*, *б*, – эквивалентной электрической схемы замещения чувствительного элемента. Конструктивно ЧЭ состоит из следующих частей: цилиндрической стеклянной колбы *e*, соединенной с диэлектрическим основанием *d*, в которое встроены металлические электроды *1–5*, не полностью погруженные в жидкий электролит *f*, причем электроды *1–4* расположе-

ны в вершинах квадрата и симметрично расположены относительно центрального электрода 5, положение которого совпадает с центром основания d . Пространство между верхней частью колбы e и поверхностью электролита f заполнено воздухом, либо инертным газом g .

Принцип действия электролитического ЧЭ основан на сохранении горизонтальности уровня электролита при повороте корпуса ЧЭ относительно его чувствительных осей. Пусть ось, проходящая через точки соединения электродов 1, 2 с диэлектрическим основанием d , будет осью X , соответственно, ось, проходящая через электроды 4, 3 в той же плоскости, – осью Y (см. рис. 1, *a*). Тогда поворот ЧЭ относительно оси X приведет к тому, что электрическое сопротивление электролита между центральным электродом 5 и электродами 4, 5 изменится. Мера этого изменения и будет характеризовать угол поворота (наклон). Соответствующие изменения электрического сопротивления произойдут и при повороте ЧЭ относительно оси Y , но между опять же электродом 5 и электродами 1 и 2. Эквивалентная электрическая схема замещения ЧЭ представлена на рис. 1, *б*, где R_{x0} , R_{y0} – сопротивление между центральным электродом и боковыми электродами, расположенными по соответствующим осям; ΔR и Δr – изменения сопротивлений при повороте ЧЭ по осям X и Y .

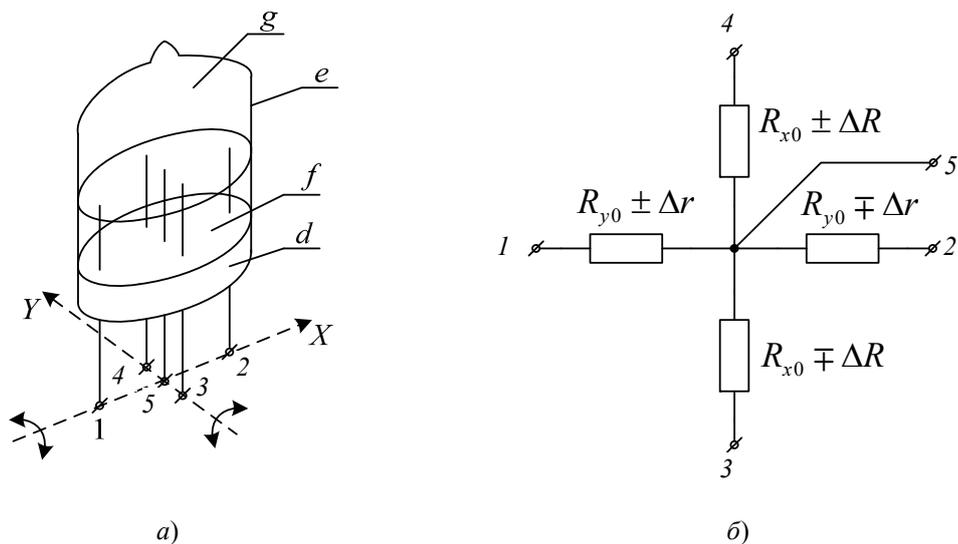


Рис. 1. Конструктивное устройство электролитического чувствительного элемента (*a*); эквивалентная схема замещения электролитического датчика (*б*)

При идеально исполненной конструктивной части ЧЭ нет оснований считать, что сопротивления R_{x0} и R_{y0} различны. Положим, что $R_{x0} = R_{y0} = R$. Кроме того, при повороте ЧЭ на одинаковый угол относительно осей X и Y изменения сопротивлений также одинаковы.

Особенностью построения измерительных схем для жидкостных ЧЭ является включение соответствующих сопротивлений не в виде мостовой схемы (с дополнением внешними резисторами), а в виде делителя напряжения [5], [6]. Это объясняется тем, что электрическая проводимость любого электролита очень сильно зависит от температуры (примерно удваивается при увеличении температуры на 10 °С).

Способ включения двухосевого ЧЭ представлен на рис. 2, *a*. Общий электрод в такой схеме оказывается гальванически связанным для выходов делителей по осям X и Y . На рис. 2, *a* приняты следующие обозначения: δ_R , δ_r – относительные изменения со-

противления между электродами по осям X и Y , соответственно; E_x , E_y – напряжения питания соответствующих делителей; U_5 – напряжение на общем электроде. Питание ЧЭ производится переменным током для предотвращения влияния на результат преобразования поляризационного потенциала. Будем полагать, что в напряжении U_5 при последующей обработке имеется возможность разделения составляющих обусловленных напряжениями E_x и E_y , так как это делается, например, в [5].

Для нахождения напряжения U_5 воспользуемся методом наложения. Закоротим E_y и найдем $U_5(E_x)$:

$$U_5(E_x) = E_x \frac{R(1-\delta_r) // R(1+\delta_r) // R(1-\delta_R)}{R(1-\delta_r) // R(1+\delta_r) // R(1-\delta_R) + R(1+\delta_R)},$$

после упрощения получаем:

$$U_5(E_x) = \frac{E_x}{4} \frac{1 + \delta_R + \delta_r^2 \delta_R - \delta_r^2}{1 - 0,5\delta_r^2 - 0,5\delta_R^2}.$$

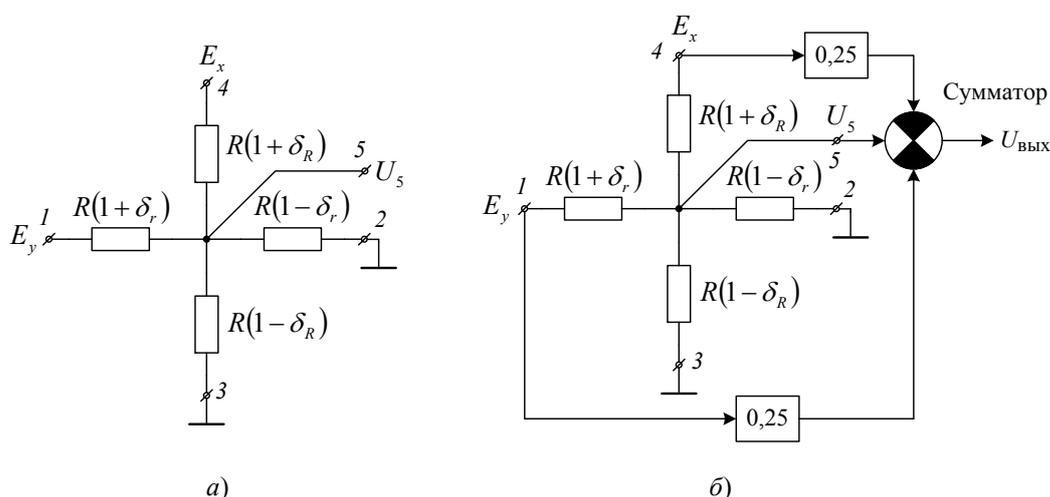


Рис. 2. Способ подачи напряжения питания E_x , E_y на электролитический ЧЭ (а); структурная схема измерительной цепи ЧЭ (б)

Выражение для $U_5(E_y)$ имеет следующий вид:

$$U_5(E_y) = E_y \frac{R(1-\delta_R) // R(1+\delta_r) // R(1-\delta_r)}{R(1-\delta_R) // R(1+\delta_r) // R(1-\delta_r) + R(1+\delta_R)},$$

после упрощения имеем:

$$U_5(E_y) = \frac{E_y}{4} \frac{1 - \delta_r + \delta_r^2 \delta_R - \delta_R^2}{1 - 0,5\delta_r^2 - 0,5\delta_R^2}.$$

Окончательно, при совместном действии E_x и E_y , имеем:

$$U_5 = \frac{E_x}{4} \frac{1 + \delta_R + \delta_r^2 \delta_R - \delta_r^2}{1 - 0,5\delta_r^2 - 0,5\delta_R^2} + \frac{E_y}{4} \frac{1 - \delta_r + \delta_r^2 \delta_R - \delta_R^2}{1 - 0,5\delta_r^2 - 0,5\delta_R^2}.$$

Из полученного выражения видно, что при нулевых поворотах ЧЭ по осям, т. е. при его горизонтальном положении, напряжение U_5 равно:

$$U_5 = \frac{E_x}{4} + \frac{E_y}{4}.$$

Для получения выходного напряжения $U_{\text{вых}}$, значение которого соответствовало нулю при горизонтальном положении ЧЭ, из напряжения U_5 необходимо вычесть напряжение $(E_x + E_y)0,25$, тогда $U_{\text{вых}}$ равно (согласно структурной схеме, представленной на рис. 2, б):

$$U_{\text{вых}} = \frac{E_x}{4} + \frac{E_y}{4} - U_5 \text{ или } U_{\text{вых}} = \frac{E_x}{4} \frac{\delta_R(1 - 0,5\delta_R + \delta_R^2) - 0,5\delta_R^2}{1 - 0,5\delta_R^2 - 0,5\delta_R^2} + \frac{E_y}{4} \frac{\delta_r(1 - 0,5\delta_r + \delta_r^2) - 0,5\delta_r^2}{1 - 0,5\delta_r^2 - 0,5\delta_r^2}.$$

Поскольку $\delta_r, \delta_R \ll 1$, то с точностью до членов третьего порядка малости полученное выражение можно записать в следующем виде:

$$U_{\text{вых}} = 0,25E_x[\delta_R(1 - 0,5\delta_R) - 0,5\delta_R^2] + 0,25E_y[\delta_r - 0,5\delta_r^2 - 0,5\delta_r^2].$$

Из этого выражения видно, что взаимовлияние наклона по осям проявляется в виде аддитивной составляющей и носит второй порядок малости. Влияние на мультипликативную составляющую проявляется третьим порядком малости и им можно пренебречь. Вводя чувствительность датчика S по соответствующим осям в следующем виде:

$$S_x = \frac{\delta_R}{\alpha_x}, \quad S_y = \frac{\delta_r}{\alpha_y},$$

где α_x, α_y – углы поворота ЧЭ относительно соответствующих осей, влияние поворота относительно оси Y при отсутствии поворота относительно оси X можно представить следующим образом:

$$0,5\delta_r^2 = \delta_R, \text{ или } 0,5S_y\alpha_y^2 = S_x\alpha_x.$$

Поскольку в двухосевых датчиках $S_x = S_y = S$, можно записать:

$$\alpha_x = 0,5S\alpha_y^2.$$

Максимальное влияние проявляется при максимальном повороте ЧЭ по противоположной оси.

Например, для электролитического сенсора AU-6004-A-001 [8] чувствительность $S = 6 \cdot 10^{-3}$ град $^{-1}$. Тогда при повороте ЧЭ относительно оси Y на 10° эквивалентное изменение по оси X будет равно:

$$\alpha_x = 0,5 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 10^2 = 0,3 \text{ град.}$$

Описанное взаимовлияние следует учитывать при значительных углах поворота и высокой чувствительности.

Заключение

В работе в общем виде получено выражение для оценки взаимного влияния поворота двухосевого электролитического ЧЭ относительно соответствующих осей.

Показано, что влияние поворота ЧЭ по противоположной оси на смещение выходного сигнала проявляется в виде аддитивной составляющей величиной второго порядка малости.

Влияние поворота ЧЭ по противоположной оси на крутизну преобразования проявляется третьим порядком малости и им можно пренебречь.

Оценено взаимовлияние наклона по осям для ЧЭ типа AU-6004-A-001.

Литература

1. Фирма HL Planartechnik. – Режим доступа: http://www.meas-spec.com/downloads/AAL_Series_Inclinometer.pdf. – Дата доступа: апрель 2016 г.
2. Фирма SEIKA Mikrosystemtechnik GmbH, Inclinometers: № 2, № 3, № 4. – Режим доступа: <http://www.seika.net>. – Дата доступа: апрель 2016 г.
3. Фирма Fraba AG, Inclinometer ACS-090-1-SVDD-VE2-AW. – Режим доступа: <http://www.posital.com>. – Дата доступа: апрель 2016 г.
4. Инженерный ресурс. – Режим доступа: http://www.life-prog.ru/view_msinv.php?id=15. – Дата доступа: апрель 2016 г.
5. Фирма Spectron, DualAxisElectrolytic TiltSensors_SP500, AV6000 Series. – Режим доступа: <http://www.spectronsensors.com>. – Дата доступа: апрель 2016 г.
6. Фирма Fredericks, 0717-4321-99, Low Profile Single/Dual Axis Electrolytic Tiltensor. – Режим доступа: <http://www.fredericks.com>. – Дата доступа: апрель 2016 г.
7. Блок управления горизонтированием. Паспорт. ЛГРИ. 401221.002 ПС.
8. Ковшов, Г. Н. Датчик наклона инклинометра на основе жидкостного уровня / Г. Н. Ковшов, Л. И. Живцова // Проблемы фундам. и приклад. наук. Метрология : тр. Одес. политехн. ун-та. – 2012. – Вып. 2 (39). – С. 272–279.
9. Шубин, А. А. Цифровой датчик угла наклона / А. А. Шубин // Методы и устройства передачи и обработки информ. – 2015. – Вып. 17. – С. 22–27.
10. Базанов, П. Датчики положения в современных системах автоматизации в примерах и иллюстрациях / П. Базанов, И. Вербов // Компоненты и технологии. – 2006. – № 7. – С. 23–27.

Получено 01.07.2016 г.