

Приборы медицинского назначения, контроля среды, веществ, материалов и изделий

УДК 537.29

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-1-64-74>

Расчет значений рабочих напряжений для безотказной работы электростатического измерителя направления малых отклонений

Н. С. Пщелко¹, О. С. Царёва^{2✉}

¹ Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

✉ tsareva_os@spbstu.ru

Аннотация

Введение. Для контроля положения конструкций и грунтового массива используют периодические геодезические наблюдения. Поскольку наиболее опасным видом деформации здания является крен, рассмотрены существующие методы его определения. На начальном этапе при обнаружении крена для своевременного принятия превентивных мер важна информация не столько о величине крена, сколько о его направлении. Поэтому задача определения направления отклонения от вертикали при малых углах отклонений является актуальной. Для повышения чувствительности рассматриваемого измерительного устройства предлагается использовать силовое действие электрического поля.

Цель работы. Расчет значений электрических напряжений, обеспечивающих надежную работу рассматриваемого устройства в зависимости от его геометрических размеров и характеристик применяемых материалов.

Материалы и методы. В устройстве используются проводящие, полупроводящие и диэлектрические материалы. Расчет основан на анализе сил, действующих на вертикально подвешенный груз в присутствии электрического поля. Рассматриваются условия равновесия и неустойчивости положения груза, возникающего за счет сильной положительной обратной связи в электрическом поле.

Результаты. Выполнен расчет, позволяющий обеспечить обоснованный выбор геометрических и электрофизических характеристик разработанного устройства. Получена формула для значений используемых электрических напряжений, обеспечивающих его безотказную работу. Рассчитанные значения искомых напряжений оказались приемлемыми для практических применений. Предложены основные элементы конструкции устройства и один из возможных способов регистрации информационного сигнала.

Заключение. Разработанное устройство в условиях неустойчивости положения груза в достаточно сильном электрическом поле отличается тем, что позволяет измерять направление отклонения даже при его значении, стремящемся к нулю. В то же время при таких малых отклонениях становятся существенными неточность изготовления устройства и влияние случайных факторов. В работе предложены способы решения этих проблем.

Ключевые слова: деформации, крен, электрическое поле, электростатические силы, неустойчивое равновесие

Для цитирования: Пщелко Н. С., Царёва О. С. Расчет значений рабочих напряжений для безотказной работы электростатического измерителя направления малых отклонений // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 1. С. 64–74. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-1-64-74

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Авторы благодарят ведущего специалиста центра интеллектуальной собственности и трансфера технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого Краснова Бориса Вячеславовича за помощь в оформлении патентов по теме работы.

Статья поступила в редакцию 23.12.2021; принята к публикации после рецензирования 28.01.2022; опубликована онлайн 28.02.2022



Calculation of Voltages Ensuring Trouble-Free Operation of an Electrostatic Meter of the Direction of Small Angle Tilts

Nikolay S. Pshchelko¹, Olga S. Tsareva²✉

¹ Military Telecommunications Academy, St Petersburg, Russia

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St Petersburg, Russia

✉ tsareva_os@spbstu.ru

Abstract

Introduction. Periodic geodetic observations are used to control the position of building structures and soil massifs. Since tilt is considered to be one of the most dangerous types of building deformations, this paper considers existing methods for its determination. When a horizontal displacement (tilt) is detected, it is of particular importance to assess not so much its angle but its direction. This allows preventive measures to be timely enforced. Therefore, determination of the direction of horizontal displacements at small tilt angles presents a relevant research problem. In order to increase the sensitivity of the considered measuring device, it is proposed to use the action of electric field.

Aim. Calculation of electrical voltages that ensure reliable operation of the device under consideration, depending on its geometric dimensions and characteristics of the materials used.

Materials and methods. The device was made of conductive, semi-conductive and dielectric materials. Calculations were based on an analysis of forces acting on a vertically suspended load in the presence of electric field. The conditions of equilibrium and instability of the position of the load arising due to strong positive feedback in electric field were considered.

Results. Calculations were performed to support a reasonable choice of geometric and electrophysical characteristics of the developed device. A formula was obtained for the values of electrical voltages that could ensure trouble-free operation of the device. The calculated values of operating voltages were found to be acceptable for practical application. The main structural elements of the device and one of the possible methods for registering information signals were proposed.

Conclusion. Due to the instable position of the load in a sufficiently strong electric field, the developed device allows the direction of displacements to be measured even when their values tend to zero. This makes the developed device promising for practical application. However, it should be noted that, under such small displacements, the accuracy of the device depends on the manufacturing conditions and random factors.

Keywords: deformations, tilt, electric field, electrostatic forces, unstable equilibrium

For citation: Pshchelko N. S., Tsareva O. S. Calculation of Voltages Ensuring Trouble-Free Operation of an Electrostatic Meter of the Direction of Small Angle Tilts. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 1, pp. 64–74. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-1-64-74

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgments. The authors are grateful to expert of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University Boris V. Krasnov for assistance in obtaining patents on the topic of work.

Submitted 23.12.2021; accepted 28.01.2022; published online 28.02.2022

Введение. Как известно, для контроля положения конструкций и грунтового массива используют периодические геодезические наблюдения. Поскольку наиболее опасным видом деформации здания является крен – отклонение объекта или его элементов от вертикали, рассмотрим существующие методы его определения.

В [1] исследуют деформации земной поверхности с использованием метода конечных элементов.

В [2] представлен разработанный недорогой прототип IATS, состоящий из инструмента RTS Leica TPS1201 и камеры GoPro Hero5 для исследования мостов под нагрузкой. В [3] рассматривается метод непрерывного мониторинга трещин в режиме реального времени, основанный на массиве датчиков на волоконной брэгговской решетке (ВБР), для мониторинга усталостных трещин в конструкциях из алюминиевых сплавов, находящихся в эксплуатации.

Расчет значений рабочих напряжений для безотказной работы электростатического измерителя направления малых отклонений
Calculation of Voltages Ensuring Trouble-Free Operation of an Electrostatic Meter of the Direction of Small Angle Tilts

В [4] авторы предлагают использование ультразвуковых датчиков для определения наклона зданий.

В [5] авторы предлагают использовать такие датчики, как тензодатчик, акселерометр и датчик вибрации, для непрерывного наблюдения за зданиями и использовать создание системы оповещения потребителей посредством Глобальной системы мобильной связи (GSM).

В [6] обсуждаются точность и функциональные аспекты оригинального инклинометра, разработанного и усовершенствованного авторами. Принцип работы устройства основан на использовании оптических волокон, проецировании света и его обнаружении на объективе ПЗС-камеры.

Отклонения от прямолинейности на всей длине элемента определяют: при помощи струны на опорах равной высоты, задающей линию отсчета, и линейки; при помощи поверочной линейки или контрольной рейки на опорах равной высоты, задающих линию отсчета, и линейки, индикатора или щупа; нивелира или теодолита, задающего линию отсчета, и линейки [7].

Также для измерения смещений отдельных участков грунтового массива или вертикально заглубленных конструкций (стен в грунте, свай, баррет и др.) применяют метод инклинометрии. При этом значение и направление горизонтального смещения определяют по приращениям угла наклона скважины или трубы, помещенной в конструкцию, за промежуток времени между циклами наблюдений [7].

Одним из видов деформаций является крен – наиболее характерный показатель общей деформации высокого сооружения. Существует значительное количество способов определения крена высоких зданий и сооружений башенного типа: по разности отметок осадочных марок; способ вертикального проектирования; способ измерения горизонтальных углов; способ определения произвольных направлений или магнитных азимутов; способ определения прямоугольных координат (способ засечек). Из других менее известных способов определения крена можно отметить способ малых углов, способ горизонтальных и вертикальных углов, способ фоторегистрации, способ одного опорного пункта, различные способы использования приборов вертикального проектирования. Известны предложения по использованию наклономеров, маятниковых кренометров, систем видеоизмерения, телевидения, GPS-приемников и электронных тахеометров [7]. Рассмотрим некоторые из них.

В способе нивелирования на цоколе здания устанавливают не менее четырех осадочных марок, после измерения осадок которых проводят линии равных осадок и вычисляют значение прироста крена ΔK сооружения:

$$\Delta K = \frac{\Delta SH}{D},$$

где ΔS – максимальная разность осадок по диаметру сооружения; H – высота сооружения; D – диаметр сооружения.

Ошибка определения прироста крена данным способом составляет в среднем 1 см при определении разности осадок с точностью до 1 мм.

В способе вертикального проецирования наклонным визирным лучом теодолита/тахеометра проецируют верхнюю точку сооружения, например, на горизонтальную рейку, закрепленную внизу сооружения. Периодически снося эту точку вниз и отмечая ее проекции, определяют увеличение крена от цикла к циклу.

Способ горизонтальных углов предусматривает наблюдения верхней точки сооружения с двух закрепленных на местности опорных точек в двух взаимно-перпендикулярных направлениях. Если с опорных точек можно наблюдать верхнюю и нижнюю точки сооружения, которые по техническим условиям должны находиться на одной отвесной линии (например, вертикальное ребро сооружения или колонны), то по разности измеренных горизонтальных углов получают полную величину крена.

Способ направлений заключается в определении произвольных направлений или магнитных азимутов, например, на образующую дымовой трубы в верхнем и нижнем (или верхнем, нижнем и промежуточных) ее сечениях.

Способ координат заключается в определении прямой однократной или многократной засечкой координат хорошо заметной точки наверху сооружения. Для этого с геодезических пунктов с известными координатами периодически измеряют горизонтальные углы между направлениями на опорные пункты и направлением на точку сооружения и вычисляют координаты x и y этой точки. По разности координат между начальным и последующими циклами наблюдений находят величину и направление крена за истекший период.

В [8] рассматривается датчик наклона на основе твердотельного акселерометра, который позволяет определить угол относительно плоскости Земли с точностью до 0.5° в двух плоскостях.

Описанные устройства не всегда возможно использовать для определения степени и направления деформаций, в частности, ввиду наличия строительных лесов на объекте. Поэтому возникла идея использовать устройство, обладающее минимальными размерами и высокой чувствительностью для определения степени деформаций (в частности, отклонений) тех элементов конструкций, которые недоступны для наблюдения традиционными геодезическими методами. Наиболее опасным видом деформации здания является крен. На начальном этапе при обнаружении крена для своевременного принятия необходимых мер по предотвращению его усиления важна информация не столько об абсолютном значении крена, сколько о его направлении. Поэтому задача определения направления отклонения от вертикали при малых углах отклонений является актуальной. Для повышения чувствительности рассматриваемого измерительного устройства предлагается использовать силовое действие электрического поля. Следует отметить, что действие электрического поля широко используется в различного рода датчиках [9–12]. При небольших межэлектродных зазорах электростатические силы могут оказаться настолько велики, что приведут к необратимому "склеиванию" электродов [13]. Однако для целей, рассматриваемых в контексте описываемой работы, электрическое поле ранее не применялось. В то же время возможность получения с его помощью достаточно больших сил совместно с эффектом неустойчивости открывает интересные перспективы его использования.

В [14, 15] было показано, что использование электростатических сил позволяет эффективно определять направление малых отклонений, что очень важно для принятия соответствующих превентивных мер, например на начальном этапе деформации зданий. Соответствующий материал был опубликован в [15]. При этом, однако, не был приведен расчет, позволяющий выбирать технические характеристики рассмотренного устройства (в частности, значение рабочего электрического напряжения), которые бы обеспечивали его надежную работу.

В связи с этим целью описываемой работы является выполнение расчета, обеспечивающего обоснованный выбор геометрических и электрофизических характеристик разработанного устройства.

Для понимания дальнейшего изложения необходимо кратко напомнить основные сведения о разработанном в [14, 15] устройстве.

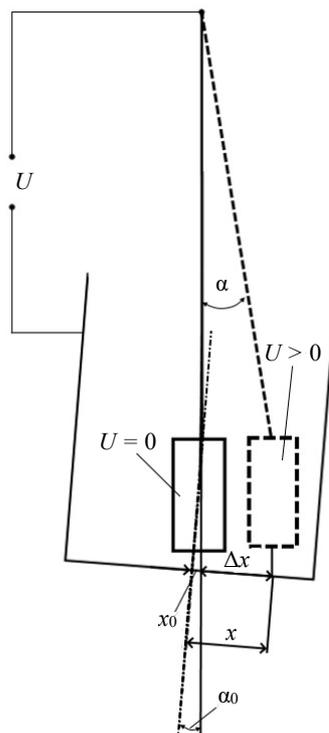


Рис. 1. Груз на нити в цилиндре при отсутствии электрического поля между грузом и стенками цилиндра и при наличии поля за счет подачи электрического напряжения U

Fig. 1. A load on a thread in a cylinder in the absence of electric field between the load and the walls of the cylinder and in the presence of electrical field due to the supply of electric voltage U

Методы. При определении направления угла малых отклонений от вертикали или горизонтали можно использовать цилиндр – груз, подвешенный на нити в круглом полном цилиндре – трубе, дно которой строго перпендикулярно стенкам (рис. 1). При очень небольшом (единицы секунд) наклоне дна нить становится не параллельна стенкам и образует с ними угол α_0 , значение которого настолько мало, что зафиксировать его и определить направление отклонения известными методами затруднительно. Для улучшения качества измерений (определения направления отклонения) в описываемой работе предлагается создать электрическое поле между цилиндрическим грузом и стенками цилиндра [14]: для этого достаточно, чтобы указанные элементы были электропроводящими или полупроводящими и изолированными друг от друга, и через электропроводящую нить подать на цилиндр и груз электрическое напряжение U . При небольших межэлектродных промежутках силовое действие электрического поля может оказаться значительным даже при использовании относительно не-

больших напряжений. При отклонении груза относительно стенок цилиндра вследствие внешних деформаций контролируемого объекта даже при очень небольшом значении α_0 расстояние между грузом и стенкой цилиндра в направлении отклонения уменьшится, а в противоположном направлении – увеличится. Это приведет к тому, что электростатическая сила притяжения в направлении отклонения возрастет, а в противоположном – уменьшится. Следовательно, груз еще больше отклонится в направлении первоначального отклонения. Таким образом, образуется положительная обратная связь – угол отклонения будет увеличиваться именно в направлении исходного отклонения, и продолжаться это будет до тех пор, пока угол не достигнет относительно большого и поэтому легко измеряемого значения α , обусловленного балансом результирующей электростатической силы и возвращающей силы, возникающей при отклонении груза на нити от вертикали за счет гравитации. Следует отметить, что если приложенное электрическое напряжение достаточно велико, то возвращающая сила может и не скомпенсировать электростатические силы. В этом случае отклонение будет продолжаться до тех пор, пока груз не коснется стенки цилиндра в направлении отклонения. Фиксируя положение этой точки, легко определить направление отклонения. Именно такой подход (использование достаточно большого напряжения) оказался на практике наиболее удобным.

Количественно представленная ситуация была рассмотрена в [15]. Предлагаемое устройство предназначено для определения направления отклонений при малых (на практике – измеряемых в секундах) углах. Углы отклонения нити, соответственно, имеют тот же порядок (рис. 1). Поэтому можно считать, что груз даже при отклонении остается расположенным приблизительно параллельно стенкам трубы-цилиндра (рис. 2). Таким образом, с учетом указанного, для расчета полей и электростатических сил будем использовать приближение плоского конденсатора.

На рис. 2 показана принятая в [15] для расчета модель. Обозначения согласованы с рис. 1. Пунктиром показано исходное положение при строго горизонтальном расположении дна трубы, штрихпунктирной линией – положение груза при небольшом наклоне дна трубы, штриховой линией – равновесное положение при подаче электрического напряжения между грузом и трубой.

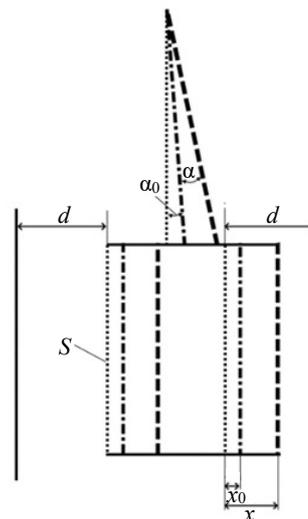


Рис. 2. Модель для расчета влияния электрического поля на отклонение груза в системе отсчета, связанной со стенками трубы-цилиндра

Fig. 2. A model for calculating the effect of electric field on the deflection of a load in a frame of reference associated with the walls of a pipe-cylinder

В действительности груз и стенки при наклоне трубы становятся не строго параллельны. Однако, поскольку углы отклонения малы, не будем учитывать это обстоятельство. Поэтому под указанными на рис. 2 расстояниями подразумеваются их средние значения (для упрощения расчета).

Электростатическая сила F_e рассчитывается по формуле

$$F_e = p_{\Sigma} S, \quad (1)$$

где p_{Σ} – результирующее пондеромоторное давление; S – тянущая площадь. При этом

$$p = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon E^2, \quad (2)$$

где ε_0 – электрическая постоянная; ε – диэлектрическая проницаемость среды между грузом и трубой; E – напряженность электрического поля, которую можно оценить как

$$E = \frac{U}{z}. \quad (3)$$

Здесь z – расстояние (зазор) между электродами, находящимися под напряжением.

Учтем, что на груз за счет электрического поля действует результирующая разность двух сил: одна направлена вправо, где зазор меньше; вторая – влево, где зазор при отклонении в рассматриваемом

мом направлении становится больше (рис. 2). На основе (1)–(3) для результирующей электростатической силы F_e можно записать:

$$F_e = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon \frac{U^2}{(d-x)^2} S - \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon \frac{U^2}{(d+x)^2} S,$$

где d – начальный зазор между стенкой трубы и грузом (до отклонения); x – отклонение груза от исходного положения, вызываемое совместным действием внешнего крена (x_0) и электростатическими силами.

После упрощения выражение для электростатической силы приобретает вид

$$F_e = 2\varepsilon_0 \varepsilon S U^2 \frac{dx}{(d^2 - x^2)^2}. \quad (4)$$

Будем считать, что рассчитанная сила направлена горизонтально (вправо на рис. 2). В результате отклонения под ее действием возникает возвращающая сила F_g , представляющая собой векторную сумму силы тяжести, действующей на груз, и сил натяжения нити и Архимеда (для создания демпфирования груз находится в цилиндре, заполненном жидкостью). В этом случае

$$F_g = P \operatorname{tg} \alpha,$$

где P – вес груза, равный разности сил тяжести и Архимеда, действующих на него:

$$P = mg - \rho g V. \quad (5)$$

Здесь m – масса груза; g – ускорение свободного падения; ρ – плотность жидкости, в которой находится груз; V – объем груза. В качестве такой жидкости представляется целесообразным использовать трансформаторное масло для повышения электрической прочности среды и создания демпфирования, препятствующего раскачиванию груза.

С учетом (5), а также того, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{x - x_0}{l},$$

где x – значение отклонения груза после подачи напряжения; x_0 – значение малого отклонения, появляющегося без использования напряжения; l – длина нити вместе с грузом, выражение для компенсирующей силы примет вид

$$F_g = (mg - \rho g V) \frac{x - x_0}{l}. \quad (6)$$

В результате баланса сил (4) и (6) груз отклоняется на заметный угол α . Для определения значения отклонения x необходимо приравнять (4) и (6) и решить относительно x соответствующее уравнение. При этом в зависимости от значения используемого напряжения возможны различные ситуации, связанные с устойчивостью положения груза.

Результаты. Рассмотрим результаты расчета в зависимости от значения приложенного напряжения.

1. Приложенное напряжение невелико и, соответственно, электростатическая сила F_{e1} также невелика, т. е. при появлении отклонения возникающая возвращающая сила будет больше электростатической (рис. 3). В этом случае имеются 2 корня – x_s и x_n (соответственно для устойчивого и неустойчивого равновесия груза). Очевидно, в рассмотренном устройстве реализуется устойчивое состояние, так как в начале движения, при малых x , электростатическая сила больше возвращающей.

2. Приложенное напряжение имеет некоторое критическое значение U_k , соответствующее границе устойчивости груза, т. е. когда x_s и x_n практически совпадают и даже при небольшом случайном отклонении в сторону стенки трубы произойдет необратимое движение груза к этой стенке вплоть до ее касания. При этом сила F_{e2} больше, чем в предыдущем случае. Для расчета значения U_k и соответствующей координаты x_k

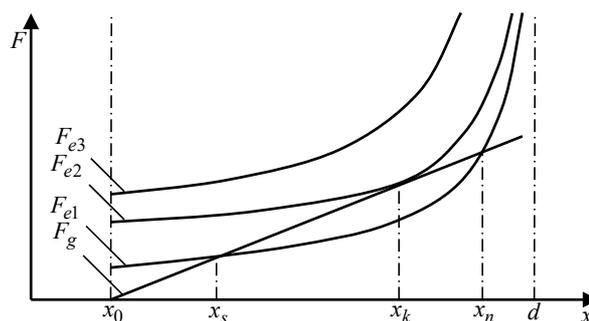


Рис. 3. Электростатические F_e и возвращающая F_g силы при $x_0 \neq 0$ в зависимости от смещения x груза от исходного положения. Соответствующие электрические напряжения $U_3 > U_2 > U_1$

Fig. 3. Electrostatic F_e and restoring F_g forces at $x_0 \neq 0$ depending on the displacement x of the load from the initial position. The corresponding electrical voltages are $U_3 > U_2 > U_1$

необходимо, как видно из рис. 3, равенство сил (4) и (6) дополнить равенством их производных:

$$\begin{cases} F_e = F_g; \\ \frac{dF_e}{dx} = \frac{dF_g}{dx}. \end{cases}$$

3. Приложенное напряжение велико и возникающая электростатическая сила при любом x больше возвращающей силы. В этом случае груз неминуемо коснется стенки трубы. При этом он будет двигаться в направлении первоначального отклонения. Как уже указывалось, этот вариант удобно использовать для определения направления отклонения, так как в рассматриваемом случае это отклонение, очевидно, максимально.

4. Напряжение приложено при очень малом значении x_0 , т. е. $x_0 \rightarrow 0$, что по сути и соответствует очень малому трудно измеряемому отклонению. Именно эта ситуация и является основным предметом рассмотрения в описываемой работе. В этом случае поведение сил в предлагаемом устройстве будет несколько отличаться от ситуации, показанной на рис. 3. Ситуацию при $x_0 \rightarrow 0$ иллюстрирует рис. 4. Видно, что при совсем небольших электрических напряжениях типа U_0 и U_1 , когда возникающая в результате отклонения возвращающая сила будет больше электростатической, движение груза к стенке трубы не начнется, так как очевидно, что для начала движения должна преобладать сила, направленная к стенке цилиндра. Положение равновесия может быть достигнуто лишь искусственным

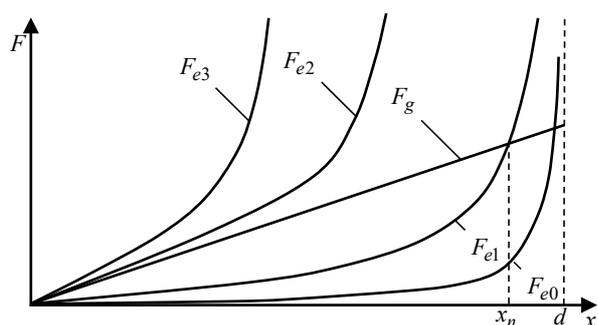


Рис. 4. Электростатические F_e и возвращающая F_g силы при $x_0 \rightarrow 0$ в зависимости от смещения x груза от исходного положения. Соответствующие электрические напряжения $U_3 > U_2 > U_1 > U_0$

Fig. 4. Electrostatic F_e and restoring F_g forces at $x_0 \rightarrow 0$ depending on the displacement x of the load from the initial position. The corresponding electrical voltages $U_3 > U_2 > U_1 > U_0$

приближением груза к стенке. Из рис. 4 видно, что положение равновесия при этом будет неустойчивым – при случайном отклонении груза возникающая результирующая сила будет направлена в сторону отклонения. Поэтому указанные значения напряжения не представляют практического интереса. При необходимости можно рассчитать рассмотренное положение равновесия x_n , приравнявая (4) и (6) при $x_0 \rightarrow 0$. Соответствующие расчеты дают следующий результат:

$$x_n = \sqrt{d^2 - \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon S U^2 d l}{mg - \rho g V}}. \quad (7)$$

На первый взгляд, полученная формула выглядит ошибочной – при увеличении прикладываемого напряжения координата, соответствующая равновесному положению, уменьшается. Однако (7) полностью соответствует показанной на рис. 4 ситуации для малых напряжений, и указанное несоответствие объясняется тем, что это положение само, только под действием напряжения, не достигается. В связи с этим, как уже отмечалось, расчет x_n большого практического значения не имеет.

Практическое значение имеет ситуация, в которой устанавливается равновесие или происходит "залипание" груза на стенку естественным образом, только под действием возникающих в системе сил. Для безотказной работы предлагаемого устройства представляют интерес ситуации, соответствующие напряжениям U_2 и U_3 (рис. 4). При этих напряжениях электростатическая сила больше возвращающей во всем диапазоне координат, что неминуемо вызовет движение груза и его гарантированное касание стенки трубы в направлении отклонения. Наибольший интерес представляет пограничная ситуация – напряжение $U_2 = U_{kk}$, где U_{kk} – критическое значение напряжения, аналогичное по физическому смыслу U_k , рассмотренному в п. 2, но относящееся к ситуации $x_0 \rightarrow 0$, т. е. очень малому отклонению, направление которого зафиксировать известными методами невозможно.

Для расчета значения U_{kk} заметим, что графики F_{e2} и F_g в окрестности $x = 0$ имеют общую касательную, поэтому производные от этих функций по x должны быть равны в окрестности

нуля. Производная от (4) после преобразований сводится к виду

$$\frac{dF_e}{dx} = 2\varepsilon_0\varepsilon S U^2 d \frac{d^2 + 3x^2}{(d^2 - x^2)^3}. \quad (8)$$

Производная от (6):

$$\frac{dF_g}{dx} = \frac{mg - \rho g V}{l}. \quad (9)$$

Приравнявая (8) и (9) при $x = 0$ и учитывая, что при этом $U = U_{kk}$, после преобразований получим для U_{kk} сравнительно простое выражение, связывающее его значение с параметрами предлагаемого устройства:

$$U_{kk} = \sqrt{\frac{(mg - \rho g V) d^2}{2\varepsilon_0\varepsilon S l}}. \quad (10)$$

Оценка значений по (10) была выполнена в [15], где приводилась без вывода. Оценим количественно рассчитанное значение, приняв к расчету реальные, легко реализуемые значения величин, входящих в (10). Для этого примем вес груза $mg - \rho g V = 0.1$ Н. Отметим, что вес груза и значение тянущей площади можно варьировать, делая груз частично полым. Исходный зазор d примем равным 0.3 мм. Остальные значения примем следующими: $\varepsilon = 2.5$; $S = 10$ см²; $l = 10$ см. При указанных значениях расчет по (10) дает 24.7 В. Такое напряжение может быть легко реализовано даже от автономных источников питания с учетом того, что потребляемый ток очень мал.

Один из вариантов регистрации измерительного сигнала заключается в измерении картины распределения электрических потенциалов на наружной поверхности трубы-цилиндра и фиксации протекающих токов в момент касания грузом ее внутренней поверхности. Если стенки трубы-цилиндра тонкие и полупроводящие, то потребляемый ток, измеренный при подключении к точке на наружной поверхности трубы, соответствующей месту касания с грузом, будет наибольшим.

В простейшем варианте в качестве сигнальных элементов можно использовать светодиоды. В приведенном на рис. 5 примере ярче остальных при касании грузом стенки загорится 11-й светодиод, так как электрическое сопротивление между грузом и стенкой трубы будет наименьшим в

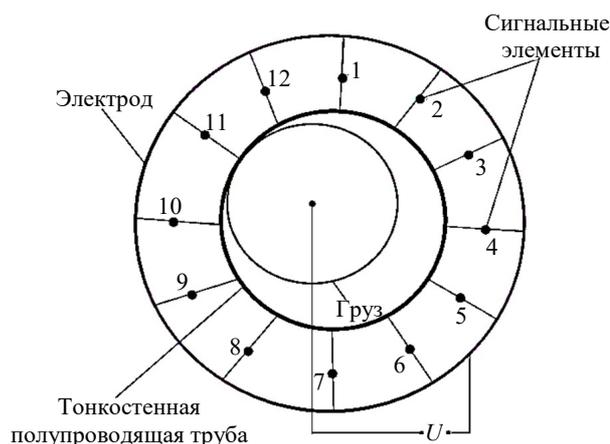


Рис. 5. Схема измерения направления отклонения (вид сверху). 1–12 – сигнальные элементы, реагирующие на появление тока в них

Fig. 5. A diagram for measuring the direction of displacement (top view). 1–12 – signal elements that respond to the flowing current

точке касания, куда подведен внутренний электрод именно 11-го светодиода.

При анализе работы предлагаемого измерителя была рассмотрена идеализированная ситуация: считалось, что устройство изготовлено абсолютно точно и поэтому расстояния от внешней поверхности груза до всех точек внутренней поверхности цилиндра до отклонения в точности равны. Не учитывалось также влияние вибраций и случайных факторов, приводящих к неконтролируемому отклонению груза. Такая модель вполне приемлема при определенных обстоятельствах и необходима для получения количественных оценок по значениям рабочих напряжений. В то же время из принципа работы устройства понятно, что в нем имеется сильная положительная обратная связь и случайное отклонение от вертикали приведет в дальнейшем к отклонению именно в эту сторону. Это обстоятельство становится особенно существенным при измерении малых отклонений. Конечно, данное устройство, как и любое другое, имеет конечную точность измерений, ограниченную технологией его изготовления и влиянием внешних факторов. Однако это не означает, что рассмотренное устройство на практике будет неработоспособным – необходимо правильно его использовать. Во-первых, вибрации можно минимизировать за счет массы груза и сильного демпфирования (поместить груз в цилиндр с вязкой диэлектрической жидкостью). На статическое отклонение, вызываемое длительным действием силы тяжести, это не повлияет. Скорее всего, по сравнению с действием силы тяжести даже при

вызываемом ею малом отклонении влиянием вибраций можно будет пренебречь. Во-вторых, при измерениях можно использовать следующий прием: даже если устройство изготовлено не идеально, в начале измерений тонкой регулировкой положения плоскости, на которой оно установлено, можно подобрать такое ее положение, что груз как раз за счет сильной положительной обратной связи будет среднестатистически равновероятно отклоняться во всех направлениях. Случайные факторы не имеют какого-то предпочтительного направления действия. Таким образом, необходимо провести много предварительных измерений и проделать большую подготовительную работу. Найденное положение следует принять за исходное. Далее, в результате отклонения, вызываемого, например, наклоном здания, появится небольшое, но определенное направления отклонение груза. При этом даже если это отклонение меньше и без того малых случайных отклонений, при выполнении большого количества измерений обнаружится корреляционная связь между направлением отклонения и показаниями измерителя в пользу искомого направления отклонения.

Выводы. Разработанное устройство позволяет измерять направление отклонения даже при его значении, стремящемся к нулю, в условиях нестабильности положения груза в достаточно сильном электрическом поле. Этим рассмотренное устройство принципиально отличается от других измерительных устройств того же функционального назначения, чувствительность которых падает с уменьшением значения отклонения, что обусловлено физическими основами их работы. Рассчитанные значения рабочих напряжений, обеспечивающих безотказную работу устройства, оказались приемлемыми для практических применений.

При определении направления особенно малых отклонений, когда на результат измерений будут влиять неточность изготовления устройства и случайные факторы, вызывающие отклонения груза, необходимо принять описанные ранее предварительные меры по "настройке" устройства, а кроме того, судить о результатах измерения направления крена не по единичному измерению, а по результатам серии измерений.

Список литературы

1. Analysis of rockburst driving mechanism based on unbalanced force / C. Y. Li, F. S. Xie, P. X. Qin, Y. Zhang, Q. Yang, Y. R. Liu, Z. S. Li // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 861, № 3. № 032047. doi: 10.1088/1755-1315/861/3/032047
2. Vibration monitoring of civil engineering structures using contactless vision-based low-cost iats prototype / R. Paar, A. Marendić, I. Jakopec, I. Grgac // Sensors. 2021. Vol. 21, № 23. № 7952. doi: 10.3390/s21237952
3. Fatigue Crack Prediction Method for Aluminum Alloy Based on Fiber Bragg Grating Array / L. Sun, C. Liu, M. Jiang, L. Zhang, F. Zhang, Q. Sui, L. Jia // Chinese J. of Lasers. 2021. Vol. 48, № 13. № 1306003. doi: 10.3788/CJL202148.1306003
4. Ultrasonic sensors enabling early detection of emergency trends and analysis of structure inclination and stability by means of highly accurate level measurements / L. Ornoch, P. Popielski, A. Olszewski, A. Kasprzak // Sensors. 2021. Vol. 21, № 5. P. 1–14. doi: 10.3390/s21051789
5. Sivagami A., Jayakumar S., Kandavalli M. A. Structural health monitoring using smart sensors // AIP Conf. Proc. 2020. Vol. 2281. № 020034. doi: 10.1063/5.0026292
6. Accuracy and functional assessment of an original low-cost fibre-based inclinometer designed for structural monitoring / K. Ćmielewski, K. Karsznia, J. Kuchmister, P. Gołuch, I. Wilczyńska // Open Geosci-ences. 2020. Vol. 12, № 1. P. 1052–1059. doi: 10.1515/geo-2020-0171
7. Шеховцов Г. А., Шеховцова Р. П. Современные геодезические методы определения деформаций инженерных сооружений / ННГАСУ. Н. Новгород, 2009. 156 с.
8. Бузыкканов С. Датчик наклона на основе твердотельного акселератора // Современная электроника. Схемные решения. 2004. С. 42–45.
9. Давыдов С. Ю., Мошников В. А., Федотов А. А. Адсорбция газов на полупроводниковых оксидах: изменение работы выхода // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30, № 17. С. 39–44.
10. Анализ локальных областей полупроводниковых нанообъектов методом туннельной атомно-силовой микроскопии / Н. А. Лашкова, Н. В. Пермьяков, А. И. Максимов, Ю. М. Спивак, В. А. Мошников // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Физ.-мат. науки. 2015. Т. 213, № 1. С. 31–42. doi: 10.5862/JPM.213.3
11. Мошников В. А., Максимов А. И. Наночастицы, наносистемы и их применение // Сенсорика, энергетика, диагностика. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2020. 280 с.
12. Налимова С. С., Мякин С. В., Мошников В. А. Управление функциональным составом поверхности и улучшение газочувствительных свойств металлооксидных сенсоров посредством электронно-лучевой обработки // Физика и химия стекла. 2016. Т. 42, № 6. С. 773–780.

13. Pshchelko N. S., Sevryugina M. P. Modeling of physical and chemical processes of anodic bonding technology // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 1040. P. 513–518. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.513

14. Пат. RU 201631 U1 G01C 9/00 (2006.01). Устройство для определения направления малых

отклонений / Н. С. Пщелко, О. С. Царева. Опубл. 24.12.2020. Бюл. № 36.

15. Пщелко Н. С., Царева О. С. Физические основы использования электрического поля для повышения точности определения направления малых углов отклонений // *Прикладная физика*. 2021. № 3. С. 60–65. doi: 10.51368/1996-0948-2021-3-60-65

Информация об авторах

Пщелко Николай Сергеевич – доктор технических наук (2011), доцент (1997), профессор кафедры физики Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Автор более 200 научных работ. Сфера научных интересов – электрофизические процессы в материалах и структурах.

Адрес: Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, Тихорецкий проспект, д. 3, Санкт-Петербург, 194064, Россия.

E-mail: nikolsp@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5545-0461>

Царёва Ольга Сергеевна – кандидат технических наук (2020), доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства Инженерно-строительного института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – деформации; объекты культурного наследия; приборы для измерения наклонов.

Адрес: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Политехническая ул, д. 29, Санкт-Петербург, 195220, Россия

E-mail: tsareva_os@spbstu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1009-1052>

References

1. Li C. Y., Xie F. S., Qin P. X., Zhang Y., Yang Q., Liu Y. R., Li Z. S. Analysis of Rockburst Driving Mechanism Based on Unbalanced Force. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 861, no. 3, № 032047. doi: 10.1088/1755-1315/861/3/032047

2. Paar R., Marendić A., Jakopec I., Grgac I. Vibration Monitoring of Civil Engineering Structures Using Contact-Less Vision-Based Low-Cost Prototype. *Sensors*. 2021, vol. 21, no. 23, № 7952. doi: 10.3390/s21237952

3. Sun L., Liu C., Jiang M., Zhang L., Zhang F., Sui Q., Jia L. Fatigue Crack Prediction Method for Aluminum Alloy Based on Fiber Bragg Grating Array. *Chinese J. of Lasers*. 2021, vol. 48, no. 13, № 1306003. doi: 10.3788/CJL202148.1306003

4. Ornoch L., Popielski P., Olszewski A., Kasprzak A. Ultrasonic Sensors Enabling Early Detection of Emergency Trends and Analysis of Structure Inclination and Stability by Means of Highly Accurate Level Measurements. *Sensors*. 2021, vol. 21, no. 5, pp. 1–14. doi: 10.3390/s21051789

5. Sivagami A., Jayakumar S., Kandavalli M. A. Structural Health Monitoring Using Smart Sensors. *AIP Conf. Proc.* 2020, vol. 2281, № 020034. doi: 10.1063/5.0026292

6. Ćmielewski K., Karsznia K., Kuchmister J., Gołuch P., Wilczyńska I. Accuracy and Functional Assessment of an Original Low-Cost Fibre-Based Inclinator Designed for Structural Monitoring. *Open Geosciences*. 2020, vol. 12, no. 1, pp. 1052–1059. doi: 10.1515/geo-2020-0171

7. Shekhovtsov G. A., Shekhovtsova R. P. *Sovremennye geodezicheskie metody opredeleniya deformatsii inzhenernykh sooruzhenii* [Modern Geodetic Methods for Determining Deformations of Engineering Structures].

N. Novgorod, NNGASU, 2009, 156 p. (In Russ.)

8. Buzykanov S. Tilt Sensor Based on a Solid-State Accelerator. *Sovremennaya elektronika. Skhemnye resheniya*. 2004, pp. 42–45. (In Russ.)

9. Davydov S. Yu., Moshnikov V. A., Fedotov A. A. Gas Adsorption on Semiconductor Oxides: Change in Work Function. *Technical Physics Lett.* 2004, vol. 30, no. 17, pp. 39–44. (In Russ.)

10. Lashkova N. A., Permyakov N. V., Maksimov A. I., Spivak Yu. M., Moshnikov V. A. Local Analysis of Areas of Semiconductor Nanoobjects by the Method of Tunneling Atomic Force Microscopy. *St. Petersburg Polytechnic University J. Physics and Mathematics*. 2015, vol. 1, no. 1, pp. 15–23. (In Russ.)

11. Moshnikov V. A., Maksimov A. I. *Nanochastitsy, nanosistemy i ikh primeneniye* [Nanoparticles, Nanosystems and Their Application]. Sensorics, Energetics, Diagnostics. SPb, Publishing house SPbGETU "LETI", 2020, 280 p. (In Russ.)

12. Nalimova S. S., Myakin S. V., Moshnikov V. A. Controlling Surface Functional Composition and Improving the Gas-Sensing Properties of Metal Oxide Sensors by Electron Beam Processing. *Glass Physics and Chemistry*. 2016, vol. 42, no. 6, pp. 773–780.

13. Pshchelko N. S., Sevryugina M. P. Modeling of Physical and Chemical Processes of Anodic Bonding Technology. *Advanced Materials Research*. 2014, vol. 1040, pp. 513–518. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.513

14. Pshchelko N. S., Tsareva O. S. *Ustroistvo dlya opredeleniya napravleniya malykh otklonenii* [Device for Determining the Direction of Small Deviations] Patent RF, no. 201631, 2020 (In Russ.)

15. Pshchelko N. S., Tsareva O. S. Physical Foundations of Using an Electric Field to Improve the Accuracy of Determining the Direction of Small Angles of Deviations. Applied Physics. 2021, no. 3. pp. 60–65. doi: 10.51368/1996-0948-2021-3-60-65 (In Russ.)

Information about the authors

Nikolay S. Pshchelko, Dr Sci. (Eng.) (2011), Associate Professor (1997), Professor of the Department of Physics of the Military Telecommunications Academy named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny. The author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: electrophysical processes in materials and structures.

Address: Military Telecommunications Academy, 3, Tikhoretsky Ave., St Petersburg 194064, Russia.

E-mail: nikolsp@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5545-0461>

Olga S. Tsareva, Cand. Sci. (Eng.) (2020), Associate Professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Civil Engineering Institute of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: deformations; objects of cultural heritage; tilt measuring instruments.

Address: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Polytechnicheskaya St., St Petersburg 195220, Russia

E-mail: tsareva_os@spbstu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1009-1052>
