Физические основы использования электрического поля для повышения точности определения направления малых углов отклонений*Н. С. Пщелко, О. С. Царёва*

Рассматриваются существующие методы геодезического мониторинга деформаций и вызываемых ими отклонений. Показано, что за счет неустойчивости положения груза, подвешенного на нити в достаточно сильном электрическом поле, возможно измерение направления отклонения контролируемого объекта даже при отклонении, стремящемся к нулю. Рассмотрена количественная модель для расчета значений используемых электрических напряжений, обеспечивающих безотказную работу устройства. Предложены основные элементы конструкции устройства и способ регистрации информационного сигнала. Делается вывод о наличии предпосылок для широкого внедрения подобных устройств для определения направления малых отклонений, основанных на использовании электрического поля.

Ключевые слова: деформации, отклонения, электрическое поле, электростатические силы.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-3-60-65

Введение

В современном мире насчитывается огромное количество объектов культурного наследия, в которых, так или иначе, развиваются деформации из-за воздействия природных и антропогенных факторов. Сохранение объектов культурного наследия является актуальной задачей для общества. В силу сложности их конструкции даже малые деформации могут привести к необратимым последствиям. Например, при соотношении высоты пилона 1/100 осадка величиной 5 мм в основании памятника может дать 5 см на высоте, что яв-

ляется недопустимым, согласно требованиям нормативных документов [1].

Наиболее эффективным способом контроля текущего состояния конструкций являются периодические геодезические наблюдения, которые выполняют с использованием различных приборов (электронных тахеометров, лазерных трекеров, сканеров) [2, 3]. Как правило, прибор устанавливается в удобную для наблюдений точку и выполняется определение координат деформационных марок, расположенных на здании. По разности координат в начальном и текущем циклах наблюдений судят о величине деформации. Причем это необходимо делать с высокой точностью, а именно, 2 мм для вертикальных перемещений и 5 мм для горизонтальных [4]. Кроме этого, в период реставрационных работ из-за наличия строительных лесов на объекте не всегда удается обеспечить видимость между прибором и деформационной маркой. Поэтому возникла идея использовать устройство, обладающее минимальными размерами и простой конструкцией для определения величин деформаций (в частности, отклонений) тех элементов конструкций, которые недоступны для наблюдения традиционными геодезиче-

Пщелко Николай Сергеевич¹, профессор, д.т.н.
E-mail: nikolsp@mail.ru

Царёва Ольга Сергеевна², ст. преподаватель, к.т.н.
E-mail: tsareva_os@spbstu.ru

¹ Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного.

Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 3.

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

Россия, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

Статья поступила в редакцию 17 марта 2021 г.

© Пщелко Н. С., Царёва О. С., 2021

скими методами. Существенным шагом в этом направлении послужило использование т. н. инклинометров, применяемых в практике геодезических работ для определения отклонений.

Инклинометр – это прибор, с помощью которого измеряют вертикальный угол отклонения от отвесного направления. Как правило, ранее такие приборы использовались для определения пространственного положения стволов скважин при наклонном бурении [5].

В качестве примера рассмотрим инклинометр ИН-Д7. Для диапазона измерений $\pm 360''$ (или $6'$) его предельная погрешность составляет около $2''$, а для диапазонов измерений $\pm 720''$ ($12'$) – $3,6''$. Его первичный преобразователь представляет собой симметричную, заполненную электролитом металлическую ампулу с пятью токовыводами. Первичный преобразователь содержит центральный подвижный электрод-маятник, играющий роль сильно демпфированного маятника, и четыре боковых электрода. Принцип действия измерителя следующий. При наклоне первичного преобразователя за счёт действия силы тяжести центральный подвижный электрод изменяет своё положение относительно боковых электродов, что приводит к изменению электрических сопротивлений заполненных электролитом межэлектродных полостей. Эти изменения электрических сопротивлений преобразуются электронной платой в выходные электрические сигналы измерителя.

Известны и более совершенные инклинометры. Так, швейцарские фирмы: Leica Geosystems и Wyler AG разработали цифровые инклинометры соответственно жидкостного принципа серии NIVEL и конденсаторного типа серии Zeromatic. Их точность определения наклона 1 мм на 100 м, что соответствует примерно $2''$ угла наклона, на сегодня остается непревзойденной. Оба инклинометра имеют цифровые выходы, возможность автоматической регистрации и передачи данных измерений в компьютер. Эти свойства позволяют встроить данные инклинометры в автоматизированные системы геодезического деформационного мониторинга (АСГДМ) [6].

Чем выше чувствительность прибора, измеряющего отклонение от вертикали или горизонтали, а также отклонение от первоначального положения контролируемого объек-

та, тем проще принять превентивные меры по исправлению его положения и не допустить усугубления отклонения. При этом важно подчеркнуть, что на начальном этапе рассматриваемого контроля не так важно знание абсолютной величины отклонения, сколько важна информация о его направлении. Очевидно также, что для широкого использования таких устройств их стоимость не должна быть слишком высокой.

Учитывая все вышесказанное, целью настоящей работы является разработка достаточно простого в конструктивном плане, но высокочувствительного устройства для определения направления отклонения контролируемого объекта от исходного положения.

Постановка работы

При определении направления угла малых отклонений от вертикали или горизонтали можно использовать устройство в виде полого цилиндра с грузом, подвешенным на нити соосно внутри него. Цилиндр имеет дно, строго перпендикулярное стенкам, как показано на рис. 1. При очень небольшом ($2''$ и менее, как отмечалось выше) наклоне дна нить становится не параллельной стенкам и образует с ними угол α_0 , величина которого настолько мала, что зафиксировать его и определить направление отклонения известными методами невозможно.

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

Отметим, что контролируемая плоскость не обязательно должна располагаться строго горизонтально. С помощью микрометрических подстроечных винтов можно само измерительное устройство расположить на плоскости так, что в исходном положении нить будет строго вертикальна.

Для улучшения качества измерений (определения направления отклонения) в настоящей работе предлагается создать электрическое поле между цилиндрическим грузом и стенками цилиндра [7]. Для этого достаточно, чтобы указанные элементы были электропроводящими или полупроводящими, но изолированными друг от друга, и через электропроводящую нить подать на цилиндр и груз электрическое напряжение величиной U . При небольших межэлектродных промежутках силовое действие электрического поля может оказаться значительным даже при использовании относительно небольших напряжений [8–10].

При отклонении груза относительно стенок цилиндра вследствие внешних деформаций контролируемого объекта даже при очень небольшом значении угла 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, а потому 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, очевидно, легко определить направление отклонения. Именно такой подход (использование достаточно большого напряжения) оказался на практике наиболее удобным.

Упрощенные оценки

Рассмотрим количественно представленную ситуацию на основе упрощенной модели: углы будем считать малыми, и поэтому будем использовать приближение плоского конденсатора. Реальная ситуация, конечно, сложнее, однако, в связи с исключительно малыми значениями углов отклонений, это не влияет на качественную справедливость результатов. Во всяком случае, количественные оценки позволят выявить порядок физических величин, в диапазоне которых предлагаемая методика оказывается эффективной.

На рис. 2 показана принятая для расчета модель. Обозначения здесь согласованы с рис. 1.

Рис. 2. Модель для расчета. Точечный пунктир – исходное положение при строго горизонтальном расположении дна трубы. Штрихпунктирная линия – положение груза при небольшом наклоне дна трубы. Пунктирная линия – равновесное положение при подаче электрического напряжения между грузом и трубой.

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, а S – тянущая площадь. При этом пондеромоторное давление

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

где ε_0 – электрическая постоянная (в системе СИ); ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды между грузом и трубой; E – напряженность электрического поля, которую можно оценить как

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

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

Учитываем, что на груз со стороны электрического поля действует разность сил: одна направлена вправо, где зазор меньше, а вторая – влево, где зазор при отклонении в рассматриваемом направлении становится больше (см. рис. 2). Тогда на основе формул (1)–(3) для результирующей электростатической силы F_e можно записать:

$$F_e = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon \frac{U^2}{d-x} S - \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon \frac{U^2}{d+x} S. \quad (4)$$

После упрощения выражение для электростатической силы приобретает вид:

$$F_e = 2 \varepsilon_0 \varepsilon S U^2 \frac{dx}{d^2 - x^2}. \quad (5)$$

Будем считать, что рассчитанная сила направлена горизонтально (т. е. вправо на рис. 2). В результате отклонения груза под ее действием возникает возвращающая сила F_g ,

представляющая собой векторную сумму сил тяжести, действующей на груз, сил натяжения нити и архимедовой силы (для создания демпфирующей груз находится в цилиндре, заполненном жидкостью). В этом случае

$$F_g = P \times \operatorname{tg} \alpha, \quad (6)$$

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

$$P = mg - \rho g V \quad (7)$$

где m и V – масса груза и его объем соответственно, а ρ – плотность жидкости, в которой находится груз. В качестве такой жидкости представляется целесообразным использовать трансформаторное масло для повышения электрической прочности среды и создания демпфирования, препятствующего раскачиванию груза.

С учетом того, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{x - x_0}{l}, \quad (8)$$

где l – длина нити вместе с грузом, выражение для компенсирующей силы примет вид:

$$F_g = mg - \rho g V \frac{x - x_0}{l}. \quad (10)$$

В результате баланса сил (5) и (10) груз отклоняется на заметный угол α . Для определения величины отклонения x необходимо приравнять (5) и (10) и решить относительно x соответствующее уравнение. При этом в зависимости от значения используемого напряжения возможны различные ситуации, связанные с устойчивостью положения груза. Рамки данной статьи не позволяют подробно проанализировать все эти ситуации. Соответствующие расчеты были выполнены в работе [7].

Рассмотрим наиболее интересный из полученных результатов, а именно, когда даже при $x_0 \rightarrow 0$, т. е. при очень малых начальных отклонениях груз гарантированно не будет иметь устойчивого равновесия и, следовательно, под действием электростатических сил приблизится к стенке цилиндра и в итоге коснется ее, причем в направлении исходного отклонения. Расчеты показали, что величина

используемого напряжения при этом должна быть не меньше, чем

$$U_{kk} = \sqrt{\frac{mg - \rho g V d^3}{2\varepsilon_0 \varepsilon S l}}. \quad (11)$$

Это сравнительно простое выражение связывает значение необходимого для использования напряжения с параметрами предлагаемого устройства.

Оценим количественно рассчитанное значение, приняв к расчету реальные, легко реализуемые значения величин, входящих в формулу (11). Для этого примем вес груза $(mg - \rho g V) = 10 \text{ гс} = 0,1 \text{ Н}$. Отметим, что вес груза и значение тянущей площади можно варьировать, делая груз частично полым. Исходный зазор d примем равным 0,3 мм. Остальные значения: $\varepsilon = 2,5$; $S = 10 \text{ см}^2$; $l = 10 \text{ см}$. При указанных значениях расчет по (11) дает значение 24,7 В. Такое значение напряжения может быть легко реализовано даже от автономных источников питания с учетом того, что потребляемый ток очень мал.

Варианты использования метода

Отметим, что возможны следующие варианты практического использования устройства:

1. Напряжение включается заранее, т. е. до того, как начало происходить отклонение под действием внешних факторов. В этом случае должны использоваться напряжения близкие, но не превышающие U_{kk} (в противном случае груз-подвес при подаче напряжения сразу сваливался бы случайно к одной из стенок из-за любых флуктуаций — тепловых, вибрационных, случайных внешних полей);

2. Напряжение включается непосредственно перед измерением, когда уже произошло отклонение груза относительно стенок под влиянием внешних воздействий. Это более предпочтительный вариант, т. к. в этом случае при использовании напряжений, больших U_{kk} , груз гарантированно коснется стенки именно в направлении отклонения, что позволяет определить направление исходного (до подачи напряжения) отклонения, даже если оно крайне мало.

Зафиксировать направление отклонения можно, например, таким способом: трубу изготовить из полупроводящего материала и с тонкими стенками. Тогда при касании внутренней части трубы грузом электрическое сопротивление между грузом и внешней частью трубы будет наименьшим именно в точке касания (из-за малой толщины стенки), что легко зафиксировать внешними измерениями.

Заключение

В известных устройствах для измерения направления отклонения контролируемых объектов от исходного положения чувствительность этих устройств падает с уменьшением величины отклонения, что обусловлено физическими основами их работы. В предлагаемом же устройстве за счет неустойчивости положения груза в достаточно сильном электрическом поле оказывается возможным измерение направления отклонения даже при его значении, стремящимся к нулю. Фактически, точность измерений таким устройством ограничена только точностью его изготовления. Этим рассмотренное устройство принципиально отличается от аналогов. С учетом его достаточно простой конструкции, можно заключить, что имеются предпосылки для широкого внедрения предложенного устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Свод правил. Основания зданий и сооружений: (СП 22.13330.2016): утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. 2017. — 201 с.
2. Царёва О. С., Дмитриев И. И. / Политехническая неделя в Санкт-Петербурге: материалы научного форума с международным участием. Кафедра водохозяйственного и гидротехнического строительства. 2016. С. 151–154.
3. Tsareva O., Pshchelko N., Glazunov V., Yugov A. // Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Vol. 70. P. 93.
4. ГОСТ 56198–2014. Мониторинг технического состояния объектов культурного наследия. — М.: Стандартинформ, 2015.
5. Исаченко В. Х. Инклонометрия скважин. — М.: Недра, 1987.
6. Хиллер Бернд. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. — Москва, 2017.
7. Устройство для определения направления малых отклонений: пат. 201631 Рос. Федерация № 2020122159; опубл. 24.12.2020. Бюл. № 36.

8. Pshchelko N. S. // Non-Ferrous Metals. 2006. № 4. P. 27.
9. Moshnikov V. A., Gracheva I. E., Pshchelko N. S., Anchkov M. G., Levine K. L. // Smart Nanocomposites. 2011. Vol. 2. № 2. P. 165.

10. Pshchelko N. S., Sevryugina M. P. // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1040. P. 513.
11. Pshchelko N., Vodkailo E. // Materials. 2020. Vol. 13. № 24. P. 5669.

PACS: 41.20.Cv

Physical foundations of using an electric field to improve the accuracy of determining the direction of small angles of deviations

N. S. Pshchelko¹ and O. S. Tsareva²

¹ S. M. Budyonny Military Academy of Communications
3 Tikhoretsky prospekt, St. Petersburg, 194064, Russia
E-mail: nikolsp@mail.ru

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Polytechnicheskaya, St. Petersburg, 195251, Russia

Received March 17, 2021

The existing methods of geodetic monitoring of deformations and deviations caused by them are considered. It is shown that due to the instability of the position of the load suspended on a thread in a sufficiently strong electric field, it is possible to measure the direction of deviation of the observed object even when the deviation tends to zero. A quantitative model is considered for calculating the values of the electrical voltages used to ensure the failure-free operation of the device. The main structural elements of the device and a method for recording an information signal are proposed. It is concluded that there are prerequisites for the widespread implementation into practice of devices for determining the direction of small deviations based on the use of an electric field.

Keywords: deformations, deflections, electric field, electrostatic forces.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-3-60-65

REFERENCES

1. Set of rules. Soil bases of buildings and structures: (SR 22.13330.2016): approved by order of the Ministry of Construction and Housing and Utilities of the Russia. 2017.
2. O. S. Tsareva and I. I. Dmitriev, in *Polytechnic week in St. Petersburg: materials of a scientific forum with international participation. Department of water management and hydraulic engineering*. (Publishing house of Polytechnic University, 2016). pp. 151–154
3. O. Tsareva, N. Pshchelko, V. Glazunov, and A. Yugov, *Lecture Notes in Civil Engineering* **70**, 93 (2020).
4. State standard 56198–2014. *Monitoring of technical state of the cultural heritage objects* (Standartinform, Moscow, 2015).
5. V. Kh. Isachenko, *Well inclinometry* (Nedra, Moscow, 1987).
6. Hillier Bernd, PhD thesis. Moscow, 2017.
7. *Device for determining the direction of small deviations*: RF patent 201631 U1. Published: 24.12.2020. Bulletin No. 36.
8. N. S. Pshchelko, *Non-Ferrous Metals*, No. 4, 27 (2006).
9. V. A. Moshnikov, I. E. Gracheva, N. S. Pshchelko, M. G. Anchkov, and K. L. Levine, *Smart Nanocomposites* **2** (2), 165 (2011).
10. N. S. Pshchelko and M. P. Sevryugina, *Advanced Materials Research* **1040**, 513 (2014).
11. N. Pshchelko and E. Vodkailo, *Materials* **13** (24), 5669 (2020).