

## Современные электронные датчики угла наклона: обзор основных физических принципов функционирования и перспективных разработок

Д. К. Кострин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

dkkostrin@mail.ru

**Аннотация.** Электронные датчики угла наклона, также называемые инклинометрами, представляют собой устройства, измеряющие горизонтальный наклон, и широко используются во многих областях науки и техники. В статье не только рассматриваются основные физические принципы функционирования таких датчиков, но и приведены примеры некоторых перспективных разработок в данной области. В настоящее время все большее распространение получают устройства для измерения углов наклона, построенные на базе электронных акселерометров. Однако такие приборы имеют существенный недостаток, выражающийся в том, что чем больше измеряемый угол наклона, тем меньше становится чувствительность устройства. Актуальна разработка специализированных инклинометров, имеющих более высокую производительность и меньшее энергопотребление – такие датчики используют твердотельную, жидкостную или газовую свободную массу, которая приводится в движение под действием гравитационных сил. Для измерения реакции на силу тяжести чаще всего используются резистивные, емкостные, индуктивные, магнитные, волоконно-оптические и оптические методы. В жидкостных датчиках угла наклона с электрическим выходом в качестве проводящей среды обычно используется ртуть или электролит, при этом также разрабатываются устройства с ферромагнитной жидкостью. Оптические инклинометры невосприимчивы к электромагнитным помехам, что подходит для экстремальных условий эксплуатации и обеспечивает потенциально высокую производительность. Большинство данных приборов представляют собой волоконные датчики с брэгговской решеткой. В тепловых инклинометрах наклон анализируется по изменению сопротивления электродов в температурном поле горячего воздушного потока в герметичной камере. Емкостные инклинометры обладают рядом преимуществ – простотой конструкции, бесконтактным измерением и возможностью длительного линейного перемещения. Необходимо отметить, что кроме датчиков угла наклона разрабатываются и успешно применяются переключатели, размыкающие или замыкающие электрические контакты при достижении определенного угла наклона.

**Ключевые слова:** датчик угла наклона, инклинометр, акселерометр, свободная масса, гравитационные силы, маятник, контроль перемещения

**Для цитирования:** Кострин Д. К. Современные электронные датчики угла наклона: обзор основных физических принципов функционирования и перспективных разработок // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 6. С. 5–23. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-6-5-23.

## Modern Electronic Tilt Angle Sensors: an Overview of the Basic Physical Principles of Operation and Prospective Developments

D. K. Kostrin

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

dkkostrin@mail.ru

**Abstract.** Electronic tilt angle sensors, also called inclinometers, are devices that measure horizontal tilt and are widely used in many fields of science and technology. This paper considers not only the basic physical principles of the functioning of such sensors, but also provides examples of some promising developments in this field. Currently, tilt angle measuring devices based on electronic accelerometers are becoming increasingly common. At the same time, such devices have a significant disadvantage, which is expressed in the fact that the greater the measured angle of inclination, the lower the sensitivity of the device becomes. An important task is to develop specialized inclinometers with higher performance and lower power consumption. Such sensors use solid-state, liquid or gas free mass, which is driven by gravitational forces. Resistive, capacitive, inductive, magnetic, fiber-optic and optical methods are most often used to measure the reaction to gravity. Mercury or electrolyte is usually used as a conductive medium in liquid tilt sensors with an electric outlet, while devices with ferromagnetic liquid are also being developed. Optical inclinometers are immune to electromagnetic interference, which is suitable for extreme operating conditions and provides potentially high performance. Most of these devices are fiber sensors with a Bragg grid. In thermal inclinometers, the slope is analyzed by changing the resistance of the electrodes in the temperature field of the hot air flow in a sealed chamber. Capacitive inclinometers have a number of advantages, such as simplicity of design, non-contact measurement and the possibility of extended linear movement. It should be noted that in addition to tilt angle sensors, switches are being developed and successfully applied that open or close electrical contacts when a certain angle of inclination is reached.

**Keywords:** tilt angle sensor, inclinometer, accelerometer, free mass, gravitational forces, pendulum, motion control

**For citation:** Kostrin D. K. Modern Electronic Tilt Angle Sensors: an Overview of the Basic Physical Principles of Operation and Prospective Developments // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 6. P. 5–23. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-6-5-23.

**Введение.** Датчики угла наклона, или инклинометры, – это устройства, измеряющие горизонтальный наклон и широко используемые в астрономических приборах, строительстве, геологических исследованиях, аэрокосмической промышленности, медицине, судоходстве, оборудовании точной автоматизации, робототехнике, а также в других областях инженерных технологий [1]–[18].

Все существующие инклинометры можно разделить на механические, оптические и электронные [19]. При этом традиционный пузырьковый уровнемер по-прежнему используется при измерении углов в большинстве отраслей промышленности (рис. 1). Метод определения горизонтальности и вертикальности объекта с его помощью основан на наблюдении положения пузырька в жидкости. Такие пузырьки очень нестабильны и легко поддаются разрушению, а оценить уровень можно только приблизительно, без определения конкретного угла наклона. Также

существуют ртутные инклинометры, в которых для индикации наклона объекта используется колба со ртутью.



Рис. 1. Пузырьковый уровнемер  
Fig. 1. Bubble level gauge

Измерение углов наклона – важная часть геометрической метрологии, при этом диапазон измеряемых углов достаточно широк. В зависимости от пространственного положения плоскости углы можно разделить на горизонтальный

(азимутальный) в направлении горизонтальной плоскости и вертикальный (угол наклона) в вертикальном направлении. При этом пространственный угол будет равняться сумме горизонтального и вертикального углов. Принцип действия инклинометра заключается в измерении направления ускорения свободного падения в системе координат, связанной с целевым объектом, что позволяет вычислить углы отклонения вертикальной оси объекта от идеального положения. Современные электронные датчики угла наклона могут обеспечивать разрешение измерения порядка  $0.001^\circ$  при точности преобразования до  $0.1^\circ$ .

**Датчики угла наклона на основе акселерометров.** В настоящее время все большее распространение получают устройства горизонтирования и измерения углов наклона, построенные на базе микроэлектромеханических акселерометров [20]–[28]. Наиболее распространены в таких акселерометрах емкостный, пьезорезистивный, резонансный, тепловой и оптический механизмы преобразования. Первые три типа акселерометров содержат инерционную массу, которая ускоряется в ответ на гравитационные силы, причем смещение данной массы может быть затем переведено в угол наклона. Инерционная масса в микроэлектромеханических акселерометрах имеет размеры в десятки микрометров и изготавливается с использованием процессов микропроизводства, что увеличивает стоимость и сложность производственного процесса. Исходный сигнал емкостных акселерометров имеет низкое соотношение сигнал/шум, что требует сложных схем усиления и шумоподавления, еще больше усложняя их производство и увеличивая энергопотребление готовых устройств.

В свою очередь, пьезорезистивные акселерометры чувствительны к изменениям температуры и, следовательно, требуют методов температурной компенсации, что усложняет устройство датчика. Хотя тепловые акселерометры намного проще в изготовлении, поскольку они не имеют инерционной массы, принцип их работы основан на теплопередаче, что делает их отклик очень медленным.

Все датчики угла наклона, основанные на измерении ускорения в поле силы тяжести, имеют общий недостаток, выражающийся в том, что чем больше угол наклона, измеряемый датчиком, тем меньше становится его чувствительность. Таким образом, техническая задача состоит в повышении чувствительности для достижения точного

измерения угла наклона с помощью датчика ускорения в широком диапазоне.

Использование измерения по двойной оси обеспечивает постоянную чувствительность измерительного прибора. Из-за вертикальной зависимости двух осей измеренное ускорение по оси  $x$  пропорционально синусу угла, а измеренное ускорение по оси  $y$  – косинусу соответствующего угла. Поскольку чувствительность измерения угла наклона наиболее высока, когда он близок к  $0^\circ$ , скорость ускорения по оси сначала определяется при измерении по вертикали с двойной осью. Когда угол наклона увеличивается, чувствительность по одной оси уменьшается вместе с увеличением чувствительности по другой оси. В результате значение чувствительности в целом остается постоянным. Использование двухосевого измерения позволяет различать различные квадранты и измерять углы наклона системы во всем диапазоне (рис. 2) [29].

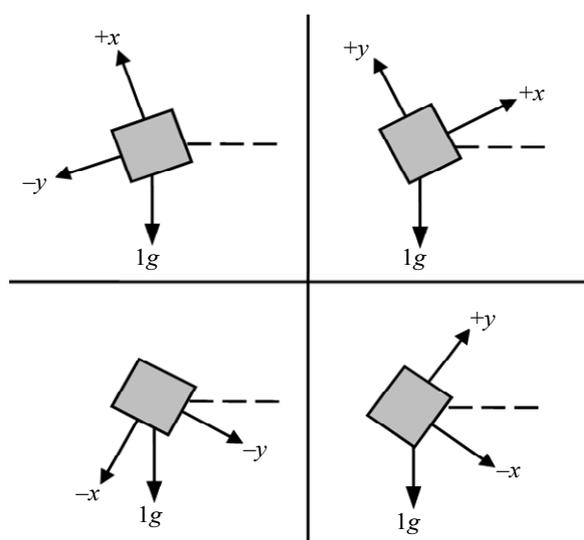


Рис. 2. Определение угла наклона с помощью двухосевого акселерометра

Fig. 2. Determining the angle of inclination using a two-axis accelerometer

Использование не только акселерометра, но и гироскопа (часто содержащихся в одном корпусе) работает еще в большей степени в пользу повышения точности работы датчика. Таким образом можно создать динамический инклинометр, который может работать в статических, квазистатических и динамических условиях [30], [31].

Топология интегрированной структуры резонансного микроэлектромеханического гироскопа-акселерометра показана на рис. 3. Конструкция данного датчика имеет только две инерционные массы и, несмотря на свои чрезвычайно миниатюрные

размеры, позволяет дифференциально определять две разные угловые скорости и две разные составляющие линейного ускорения [32]. Резонансное определение используется для четырехосевой системы с двумя различными типами резонаторов, колеблющихся соответственно при изгибе и кручении. Дифференциальное считывание сигнала позволяет определять внешние величины даже при наличии внешних напряжений, вызванных, например, колебаниями температуры. Кроме того, дифференциальное считывание увеличивает диапазон линейности и чувствительность данного инерциального датчика.

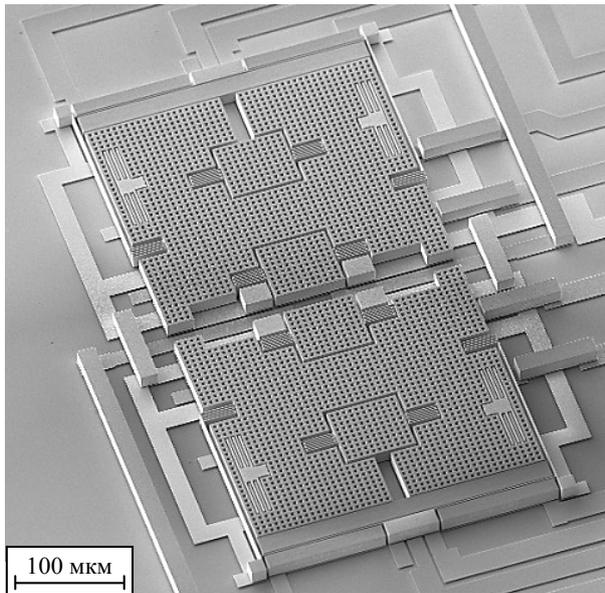


Рис. 3. Топология интегрированной структуры резонансного микромеханического гироскопа-акселерометра

Fig. 3. Topology of the integrated structure of the resonant micromechanical gyroscope-accelerometer

Необходимо отметить, что акселерометры на базе микроэлектромеханических технологий обладают избыточными функциями, которые не нужны, когда необходимо определить только угол наклона. Гравитационные силы сравнительно невелики по сравнению с другими действующими на объект силами. Движения, происходящие под действием силы тяжести, не требуют большой полосы пропускания и диапазонов ускорений, которые обеспечивают микроэлектромеханические акселерометры. Таким образом, актуальна разработка специализированных инклинометров, предназначенных, в частности, для измерения углов наклона с более высокой производительностью и меньшим энергопотреблением по сравнению с микроэлектромеханическими акселерометрами.

Специализированные инклинометры используют свободную массу (твердотельную, жидкостную или газовую), которая приводится в движение под действием гравитационных сил. Для измерения реакции свободной массы на силу тяжести используются резистивные, емкостные, индуктивные, магнитные, волоконно-оптические и оптические методы [33]. Например, жидкостные датчики угла наклона измеряют изменение сопротивления или емкости из-за движения жидкости, вызванного силой тяжести. Однако наличие жидкости в качестве чувствительного элемента увеличивает сложность изготовления, а изменения условий окружающей среды влияют на ее текучие свойства.

**Датчики угла наклона с твердотельной массой.** Самым простым видом электронных инклинометров, являются датчики с твердотельным маятником. В таких устройствах длина самого маятника и его подвеса зафиксированы, а механизм работы в основном аналогичен акселерометру. Существует множество методов измерения перемещения твердотельного маятника, например, индуктивный, потенциометрический, деформационный и др. [33]. Диапазон измерения датчика угла наклона с твердотельным маятником больше, а точность и способность к перегрузке выше, чем для других аналогичных датчиков.

Конструкция индуктивного датчика угла наклона приведена рис. 4. Два плеча датчика представляют собой две колонны, формирующие сердечники индуктивностей с идентичными характеристиками, симметрично размещенные на жестком каркасе [34], [35]. В равновесном состоянии твердотельный маятник расположен на одинаковом расстоянии от двух сердечников, и мостовая схема находится в балансе. При наклоне внешнего жесткого корпуса твердотельный маятник продолжает висеть вертикально, но зазор между ним и одним из двух сердечников индуктивностей будет увеличен, а зазор между ним и другой индуктивностью – уменьшен. В результате индуктивности изменятся, и электрический мост выйдет из состояния равновесия, возникнет дифференциальный сигнал напряжения, зависящий от угла наклона. Такой датчик характеризуется очень высоким разрешением.

Далее будут рассмотрены специализированные инклинометры, использующие современные методы контроля перемещения свободной массы под воздействием силы гравитации. При этом необходимо отметить, что кроме датчиков угла

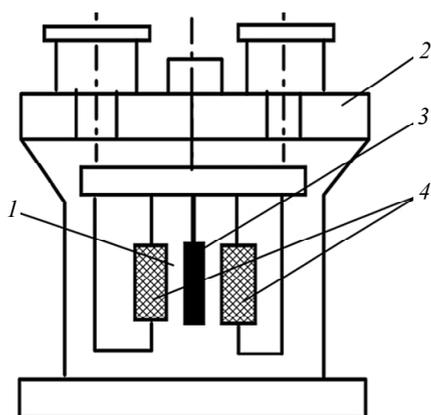


Рис. 4. Конструкция индуктивного датчика угла наклона с твердотельным маятником:

1 – зазор; 2 – каркас; 3 – маятник;

4 – сердечники индуктивностей

Fig. 4. Design of an inductive tilt angle sensor with a solid-state pendulum:

1 – gap; 2 – frame; 3 – pendulum; 4 – inductance cores

наклона разрабатываются и успешно применяются переключатели, срабатывающие при достижении определенного угла наклона [36]. Такие переключатели способны контролировать близкое к горизонтальному состояние в некотором интервале углов наклона (т. е. около равновесного состояния), чаще всего имеющего размах в десятки градусов. При этом может быть реализовано как размыкание, так и замыкание электрических контактов при выходе угла наклона из разрешенного диапазона. Существует широкий ассортимент поворотных контактных выключателей, их типичные габаритные размеры находятся в пределах 2...30 мм, а диапазон допустимого угла наклона составляет 7...90°.

**Датчики угла наклона с жидкостной массой.** К первому типу специализированных электронных инклинометров относятся жидкостные датчики угла наклона с электрическим выходом, в которых в качестве проводящей среды обычно используется ртуть или электролит [37], [38]. Проводящей жидкостью может быть заполнена только часть объема датчика, оставляя некоторое пространство для непроводящей жидкости или же небольшого объема газообразного вещества. В силу своей токсичности ртуть все реже применяется в различных устройствах, хотя и используется до сих пор во многих относительно старых устройствах. Более того, разрабатываются некоторые конструкции датчиков, использующих ртуть, для научных и исследовательских целей, например для мониторинга перемещений животных.

Поскольку жидкостные датчики угла наклона способны обладать очень высокой чувствитель-

ностью (порядка нескольких угловых секунд или даже ниже), до сих пор производится много типов электролитических инклинометров. Такие датчики обладают аналоговыми выходами, сигнал на которых возникает в результате колебания таких электрических характеристик, как емкость или сопротивление. Можно отметить, что разрабатывается ряд датчиков, в которых применяются разнообразные жидкости, имеющие уникальные магнитные свойства [39]–[42].

Еще одна группа жидкостных датчиков угла наклона использует различные оптические методы для определения крена, например запись видеокамерами положения пузырьков воздуха, применение волоконных брэгговских решеток, лазерной автоколлимации, интерферометра, оптического волокна или стандартных фотоприемников, освещаемых источником света.

Несмотря на то, что были предприняты некоторые попытки миниатюризации жидкостных датчиков угла наклона, объем жидкости должен составлять не менее нескольких десятков кубических миллиметров, в противном случае невозможно избежать значительного механического гистерезиса из-за высоких сил сцепления и поверхностного натяжения. Датчики такого типа обладают более высоким разрешением, защитой от коррозии и влаги, но имеют длительное время отклика и плохую линейность.

Конструкция датчика, основанного на вышеописанных принципах, показана на рис. 5 [43], [44]. Датчик состоит из цилиндра из боросиликатного

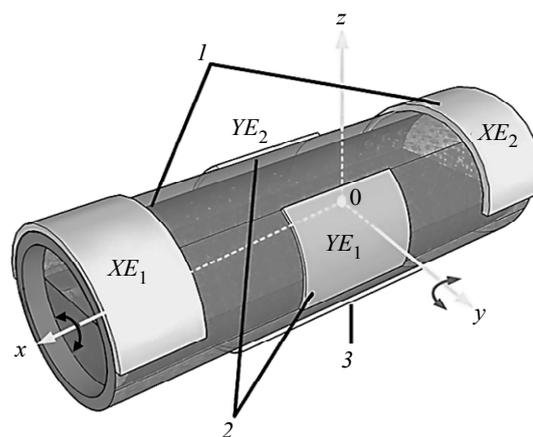


Рис. 5. Конструкция инклинометра, основанного на принципе дифференциального конденсатора:

1, 2, 3 – электроды для измерения угла тангажа, угла крена и возбуждения соответственно

Fig. 5. Design of an inclinometer based on the principle of a differential capacitor:

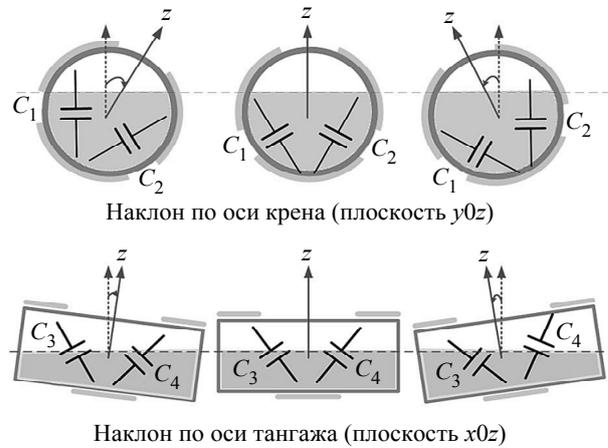
1, 2, 3 – electrodes for measuring pitch angle, roll angle and excitation, respectively

стекла, заполненного двухфазной смесью из воздуха и жидкости и окруженного пятью электродами. Цилиндр содержит смесь бензина и воздуха и герметично закрыт с помощью эпоксидной смолы для устранения возможного просачивания бензина. Выбор бензина обусловлен как его малым поверхностным натяжением, так и незначительной вязкостью, дающими возможность пузырькам в цилиндре передвигаться достаточно быстро и оседать в случае столкновения со стенками.

Первоначально в таких датчиках электроды были помещены внутрь микроканала и защищены изолирующим слоем (тонким слоем  $\text{SiO}_2$  или полидиметилсилоксана). Такой процесс осаждения дорогостоящ и трудоемок, а выбор материала достаточно ограничен. Кроме того, в такой системе все электроды должны располагаться в одной плоскости. В приведенном на рис. 5 устройстве электроды расположены снаружи, а цилиндр из стекла играет роль защитного слоя и обеспечивает изоляцию электродов от используемой жидкости. Несмотря на то, что толщина стенок стеклянного цилиндра сказывается на чувствительности любой конкретной пары емкостей, она оказывает ограниченное влияние на функционирование датчика в целом, поскольку бесконтактное определение проводимости с емкостной связью осуществляется в режиме дифференциального измерения, и наличие слоя стекла может быть компенсировано уровнем заряда, рассчитанным в изначальном состоянии в процессе калибровки датчика.

В рассматриваемом устройстве пропорция в смеси жидкости и воздуха по объему составляет 3 к 1. Электрод, расположенный под стеклянным цилиндром, применяется для возбуждения, а другие четыре электрода используются как чувствительные. Электроды  $XE_1$  и  $XE_2$  применяются для измерения угла крена, а электроды  $YE_1$  и  $YE_2$  для оценки угла тангажа. Все рассмотренные электроды суммарно формируют дифференциальные пары конденсаторов  $C_1-C_2$  и  $C_3-C_4$ . Значения данных дифференциальных пар емкостей изменяются при отклонениях расположения границы раздела жидкости и воздуха в стеклянном цилиндре вследствие воздействия силы тяжести при изменении угла наклона (рис. 6) [45]. Таким образом, значения емкостей дифференциальных конденсаторов  $C_1-C_2$  и  $C_3-C_4$  отвечают углам наклона устройства вдоль осей крена и тангажа, и при подаче синусоидального сигнала на возбуждаю-

щий электрод данные углы можно оценить по значениям дифференциальных напряжений  $U_{C_1}-U_{C_2}$  и  $U_{C_3}-U_{C_4}$ .



Наклон по оси крена (плоскость  $yOz$ )

Наклон по оси тангажа (плоскость  $xOz$ )

Рис. 6. Изменение емкостей при вращении датчика вокруг осей

Fig. 6. Changes in capacities when the sensor rotates around the axes

Аналогичным образом с применением технологий микропроизводства может быть построен симметричный датчик в форме куба или сферы. Выбор цилиндрической конструкции позволяет анализировать наклон по осям  $x$  и  $y$  асимметрично, но при этом такая система проще в реализации и совместима с обычными механическими устройствами.

Рассмотрим другую конструкцию жидкостного датчика угла наклона, представляющего собой электролитический датчик на основе микромеханических систем (рис. 7) [46]. Электролит содержит как положительно, так и отрицательно заряженные ионы, перемещающиеся между электродами системы. Если устройство расположено горизонтально, то электроды с обоими знаками равно-

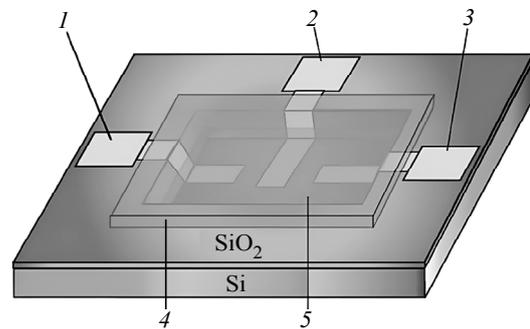


Рис. 7. Конструкция микромеханического электролитического датчика угла наклона:

1, 2, 3 – положительный, общий и отрицательный электроды; 4 – защитное стекло; 5 – электролитический раствор

Fig. 7. Design of the micromechanical electrochemical tilt angle sensor: 1, 2, 3 – positive, common and negative electrodes; 4 – protective glass; 5 – electrolytic solution

мерно опущены в электролит, что приводит к равенству их электрических потенциалов относительно третьего (общего) электрода. При наклоне датчика к электролиту прикасается более широкая область одного электрода, чем другого, что приводит к снижению его сопротивления по отношению к общему электроду. Несбалансированное отношение площади погруженной поверхности обоих электродов к площади общего электрода представляет собой угол наклона.

Как правило, электролит состоит из соли, способной проводить электрический заряд, и одного или нескольких растворителей. Для получения малого энергопотребления и хорошей разрешающей способности датчика необходимо применять сильный электролит, обладающий повышенной проводимостью, например раствор гидрата окиси калия.

Когда к электролиту прикладывается постоянный ток, наблюдается электролиз, в ходе которого отрицательно и положительно заряженные ионы перемещаются к аноду и катоду. В случае долговременного протекания данного процесса жидкость перестанет быть проводящей. Таким образом, для устранения данного эффекта в датчике для возбуждения следует использовать только переменный ток.

Рассматриваемый электролитический датчик с раствором гидроксида калия имеет приблизительно 50 мВ выходного сигнала на  $1^\circ$  изменения угла наклона и рабочий диапазон измерений  $\pm 60^\circ$ . Данный датчик потенциально может быть интегрирован со схемой считывания, что дает возможность создать интеллектуальную систему, поскольку в качестве подложки в нем используется кремний.

В свою очередь, принцип действия датчика угла наклона с ферромагнитной жидкостью может быть основан на свойстве жидкости сохранять горизонтальность своей разделительной поверхности в закрытом сосуде и на магнитных свойствах вышеупомянутой жидкости. Одна или несколько катушек, прикрепленных к небольшому контейнеру, распознают изменяющийся наклон поверхности жидкости и общее положение ферромагнитной жидкости внутри сосуда по изменениям соответствующего электрического параметра – напряжения, частоты или индуктивность [47], [48].

Описанным образом может быть построен непроницаемый датчик индуктивно-дифференциального типа, цилиндрическая стеклянная трубка которого наполовину заполнена ферро-

магнитной жидкостью. Катушка возбуждения равномерно наматывается по всей длине трубки, в то время как две чувствительные катушки наматываются последовательно и соединяются противоположным образом. Цилиндрический экран из листовой меди располагается между первичной и вторичной обмотками, что позволяет уменьшить взаимные емкостные помехи.

**Оптические датчики угла наклона.** Оптические инклинометры привлекают внимание благодаря своей невосприимчивости к электромагнитным помехам, что подходит для экстремальных условий эксплуатации и обеспечивает потенциально высокую производительность [49]–[53]. Большинство из данных датчиков представляет собой волоконные датчики с брэгговской решеткой, которые отражают определенную частоту света в соответствии с напряжением оптического волокна. Другие методы измерения включают оптический резонатор Фабри–Перо, пузырьковый уровень с фотодиодами и пропускающую дифракционную решетку. Разрешение данных датчиков весьма высокое, но такие устройства требуют достаточно сложной предварительной настройки.

Существующие датчики угла наклона с применением волоконной брэгговской решетки на основе вертикального маятника могут определять значение, а также направление угла наклона относительно горизонтального направления [54]–[61]. Датчики с волоконной брэгговской решеткой основаны на модуляции длины волны отражения в ответ на температуру и деформацию. По сравнению с другими типами волоконно-оптических датчиков, датчики с брэгговской решеткой обладают преимуществами, заключающимися в том, что они по своей сути самореферентны и способны мультиплексировать большое количество чувствительных элементов. Такой датчик определяет угол наклона по разнице длин волн между двумя волоконными брэгговскими решетками, чтобы преодолеть проблему перекрестной чувствительности к температуре.

Еще один вид оптических датчиков угла наклона включает в себя оптоэлектронный фотодетектор с лазером, оптические компоненты и датчик обработки изображения. Принцип его работы основан на оптической интерферометрии, он обладает высокой точностью измерений и нечувствителен к магнитной среде. Такой датчик может проводить измерения по двум осям одновременно. Однако поскольку используемой в датчике жидкой средой служит масло, оно может намочить стекло,

что влияет на качество полученного изображения и приводит к погрешности измерения.

Датчик угла наклона также может быть основан на машинном зрении [62]–[67]. В плане восприятия угла наклона, он относится к датчикам жидкостного типа. Жидкой средой служит ртуть, преимущества которой включают в себя предотвращение смачивания стекла и пластика, светонепроницаемость и хорошую электропроводность. Это сводит к минимуму температурные помехи и позволяет использовать датчик в условиях большого диапазона температур. Угол наклона и его направление определяются анализом изображения, формируемого ртутью в контейнере, с помощью цифровой обработки изображений. Таким образом удастся избежать некоторых этапов косвенных измерений, которые могут привести к ненужной погрешности.

В области оптоэлектроники 3D-печать обладает значительным потенциалом для изготовления высокоэффективных чувствительных элементов посредством инкапсуляции оптического датчика в структуры, напечатанные с помощью 3D-принтера [68]–[71]. Датчики угла наклона и движения могут быть реализованы при встраивании жидкостей внутрь печатной структуры. В традиционных методах волоконные датчики обычно приклеиваются непосредственно к поверхности конструкции с помощью клея или эпоксидной смолы. Однако данный подход не может использоваться в применениях, где датчики будут подвергаться воздействию суровых условий – высокой температуры, влажности и т. д. Таким образом, встраивая волокно в трехмерную структуру,

можно реализовать более надежные и компактные конструкции, позволяющие улучшить качество волоконно-оптических датчиков (рис. 8) [72].

Для оценки углов наклона в качестве традиционных оптических измерительных приборов часто используются автоколлиматоры и электронные уровни. Благодаря использованию датчиков положения с двумя степенями свободы – матриц на основе приборов с зарядовой связью или многоэлементных фотодиодов, одновременное измерение углов наклона может быть выполнено, если поместить целевой отражатель на предметный стол и регулировать оптическую ось автоколлиматора [73]–[76].

Рассмотрим оптический датчик угла наклона со сверхнизким энергопотреблением, генерирующий цифровой сигнал [77]. Он реализован как часть гибридного решения «микромеханическая структура–комплементарная оптическая структура металл–оксид–полупроводник». Такой датчик угла наклона использует микромеханическую полукруглую массу для оптического отображения гравитационного поля, а затем применяется специальная оптическая микросхема для обнаружения и разрешения вектора направления, что проиллюстрировано на рис. 9.

Оптический детектор состоит из 66 фотоприемных элементов, расположенных в сегментах по  $5^\circ$  таким образом, чтобы охватывать поле зрения в  $330^\circ$ . Размеры матрицы датчика составляют  $2.5 \times 2.5$  мм. Конструкция разделяет поле обзора в  $330^\circ$  на две полуплоскости в  $165^\circ$ , которые называются левосторонним и правосторонним

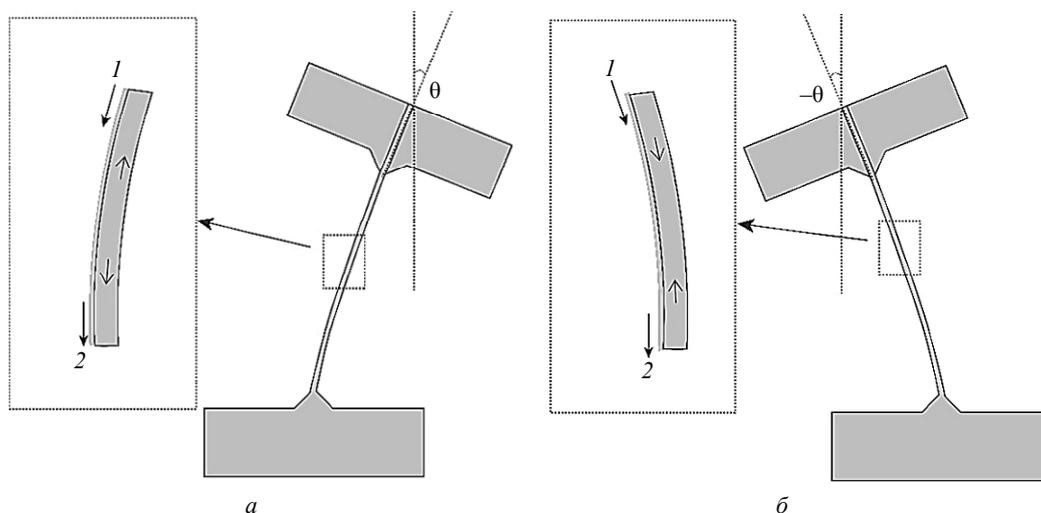


Рис. 8. Измерение угла наклона с помощью волоконно-оптического датчика:

*a* – растяжение; *б* – сжатие; 1, 2 – входной и выходной сигналы

Fig. 8. Tilt angle measurement using a fiber optic sensor:

*a* – stretching; *б* – compression; 1, 2 – input and output signals

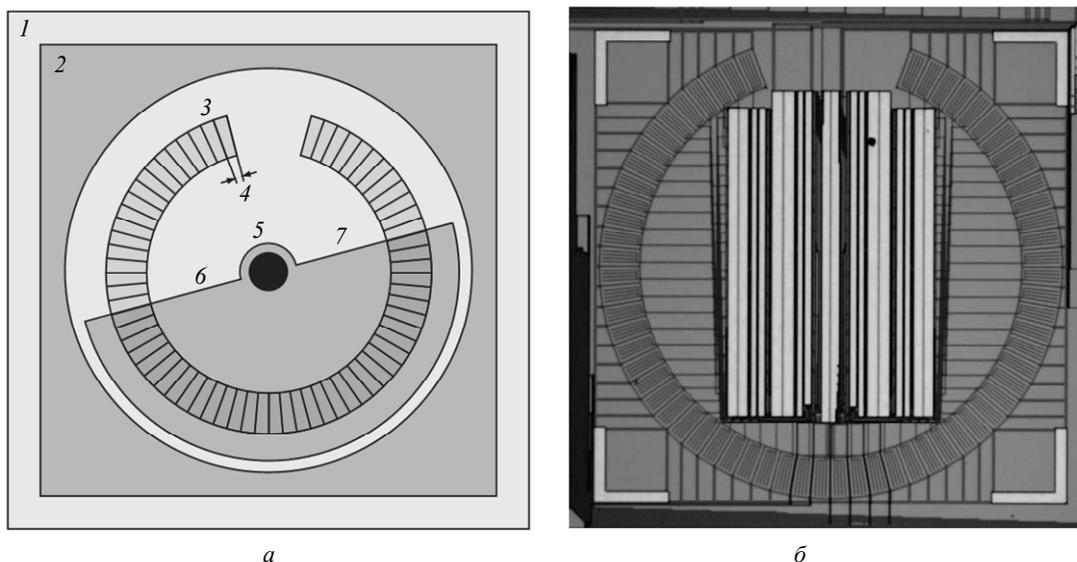


Рис. 9. Микрооптоэлектромеханический датчик угла наклона: *a* – принцип работы (*1* – область комплементарной структуры металл–оксид–полупроводник; *2* – область микромеханической структуры; *3* – массив фотодиодов; *4* – сегмент оптического детектора; *5* – точка отсчета; *6* – левосторонний горизонт; *7* – правосторонний горизонт); *б* – микрофотография  
 Fig. 9. Microoptoelectromechanical tilt angle sensor: *a* – principle of operation (*1* – area of complementary metal–oxide–semiconductor structure; *2* – area of micromechanical structure; *3* – photodiode array; *4* – optical detector segment; *5* – reference point; *6* – left-hand horizon; *7* – right-hand horizon); *б* – microphotography

горизонтами. При перемещении микромеханической полукруглой массы она формирует тень, которая проецируется на поверхность оптической матрицы, край которой пересекает как левосторонний, так и правосторонний горизонт. Следовательно, каждый датчик горизонта необходим для определения положения (или угла наклона) этих краев. Используя разницу, выходные данные могут кодировать угол наклона с помощью цифрового представления со знаком.

Микромеханический компонент сконструирован таким образом, что стержень (анкер), используемый для подвешивания массы, имеет достаточно малую площадь контактирующей поверхности и хорошую ее гладкость для гарантии недостаточности атомарных сил и трения для того, чтобы вызвать прилипание. Кроме того, масса снабжена отверстиями для предотвращения прилипания, которые обеспечивают ее высвобождение. При изготовлении конструкция включает в себя ряд стоек для фиксации массы во время обработки и высвобождения. Эти стойки были специально сконструированы таким образом, чтобы их можно было сломать после изготовления, что позволяет задействовать в работе полукруглую массу.

Для обеспечения надежности эксплуатации в условиях темноты и изменяющейся освещенности в датчике предусмотрен специальный источник света. Это может быть имеющий небольшую

площадь ( $2 \text{ мм}^2$ ), сфокусированный (с узкой областью обзора) светоизлучающий диод для стимуляции фотоприемников. Затем композитный излучатель вместе с датчиком могут быть упакованы (например, как в оптоизоляторах) для защиты компонентов от воздействия окружающей среды. Чтобы свести к минимуму энергопотребление, источник света может обладать низкой интенсивностью или быть импульсным, поскольку фотоприемники охватывают большую площадь и, следовательно, будут чрезвычайно эффективными. Минимальная интенсивность света (и, следовательно, энергопотребление) ограничена темновым током фотодиода, минимальным определяемым коэффициентом контрастности (для надежного определения границ) и требуемым временем отклика датчика.

**Тепловые датчики угла наклона.** Еще одним вариантом реализации датчиков угла наклона являются тепловые инклинометры. Подобно твердотельному или жидкостному маятнику, поток горячего воздуха также обладает чувствительной массой, которая всегда стремится оставаться вертикальной и имеет маятниковый характер. Наклон анализируется посредством измерения изменения сопротивления электрода в температурном поле горячего воздушного потока в герметичной камере.

Тепловой датчик угла наклона оснащается микронагревателями для создания естественной конвекции и термисторами для определения

направления силы тяжести. Существуют тепловые микроэлектромеханические датчики угла наклона с разрешением  $0.003^\circ$  и временем отклика  $0.6$  с в газовой среде гексафторида серы  $SF_6$ , но при этом характеризуются высоким энергопотреблением порядка  $45$  мВт. Датчики на основе углерода имеют более низкое энергопотребление при хорошей чувствительности.

Используя постоянный ток, газ внутри герметичной камеры нагревается [78], [79], и температурный профиль сдвигается в соответствии с приложенным наклоном. Датчики такого типа имеют более простую конструкцию без свободной массы, подвешенной в качестве части устройства, и более высокую ударопрочность по сравнению с твердотельными датчиками. При этом необходимо отметить, что на такие датчики влияет температура окружающей среды, а их точность измерений невелика. Кроме того, нагревателям датчика для измерения необходима высокая мощность из-за требований к температуре газа.

На рис. 10, а показана конструкция многоосевого датчика угла наклона на основе конвекции. Он включает в себя находящийся в центре структуры микронагреватель и четыре размещенных с разных сторон на равных расстояниях от него никелевых температурных датчика, характеризующихся достаточным резким ростом сопротивления при повышении температуры в используемом рабочем диапазоне. Верхний элемент корпуса содержит протравленную в нем полость и гарантирует тепловую изоляцию при свободной конвекции находящейся в ней воздушной смеси. В дальнейшем вся конструкция датчика помещается в герметичный корпус для того, чтобы избежать попадания в него воздуха из окружающего объема.

На рис. 10, б приведен принцип функционирования данного датчика, построенного на основе свободной тепловой конвекции в миниатюрной полости, содержащей воздушную среду [80]–[82]. Микронагреватель обеспечивает нагрев электрическим током таким образом, что формируется симметричный температурный профиль и тепловой баланс внутри камеры. Когда к устройству прикладывается наклонное движение, измеряется разность температур между двумя датчиками температуры, пропорциональная углу наклона. Изменения сопротивления датчиков, соответствующие углу наклона, задаются в качестве выходного напряжения.

**Емкостные датчики угла наклона.** Следующий тип датчиков угла наклона – емкостные инклинометры [83]–[86]. Емкостное измерение [87] по сравнению с другими принципами обнаружения, используемыми в датчиках угла наклона, обладает многими преимуществами – простотой, бесконтактностью измерения, длительным линейным перемещением, а процесс проектирования и изготовления таких устройств значительно проще, чем у аналогов. При этом большинство данных датчиков имеет одноосевую чувствительную конструкцию. Например, в емкостных датчиках угла наклона с плоской конструкцией вся чувствительная структура может быть изготовлена в одной плоскости, следовательно, процесс изготовления упрощен и подходит для миниатюризации системы. Однако, имея плоскую конструкцию, такой датчик не подходит для измерения угла наклона сразу по нескольким осям.

Рассмотрим простой емкостный датчик угла наклона, использующий металлический шарик. Подобный датчик имеет только два электрода. Таким образом, рассматриваемое устройство имеет

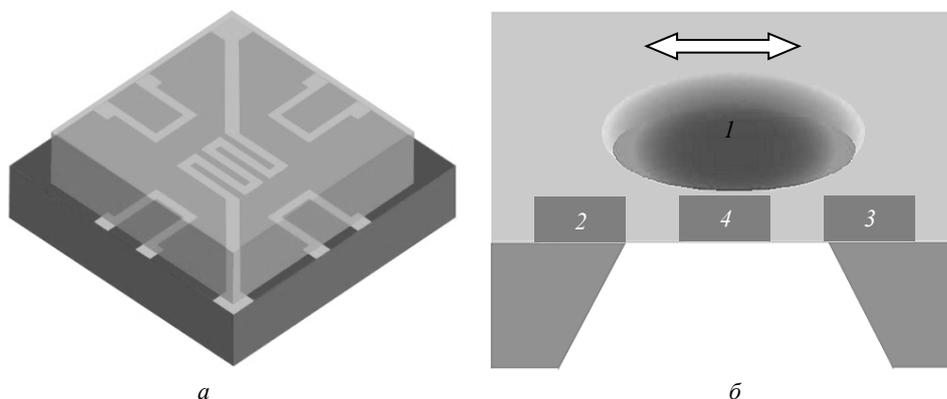


Рис. 10. Многоосевой датчик угла наклона на основе конвекции: а – конструкция; б – принцип работы (1 – нагретый газ; 2, 3 – левый и правый датчики температуры; 4 – микронагреватель)  
Fig. 10. Multi-axis tilt angle sensor based on convection: а – design; б – principle of operation (1 – heated gas; 2, 3 – left and right temperature sensors; 4 – microheater)

очень простой процесс изготовления. В такой системе не имеется точки контакта между металлическим шариком и двумя расположенными ниже электродами, что позволяет бесконтактно измерять угол наклона.

На рис. 11 показан схематичный вид рассматриваемого емкостного датчика угла наклона с использованием металлического шарика [88]. На подложке из стеклянной пластины расположены два электрода, а в полистирольную трубку помещен металлический шарик. Данная конфигурация аналогична последовательному соединению двух конденсаторов, за исключением паразитной емкости между двумя нижними электродами. Между металлическим шариком и электродами контакта нет.

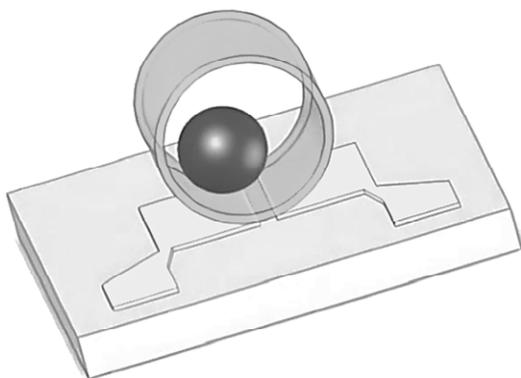


Рис. 11. Схематичный вид емкостного датчика угла наклона с металлическим шариком

Fig. 11. Schematic view of a capacitive tilt angle sensor with a metal ball

На рис. 12 показан принцип работы рассматриваемого емкостного датчика угла наклона. Емкость между левым электродом и металлическим шариком равна  $C_1$ , а емкость между правым электродом и металлическим шариком –  $C_2$ . Следовательно, емкости  $C_1$  и  $C_2$  соединены последовательно. На рис. 12, а показан датчик угла наклона при  $0^\circ$ . Металлический шарик находится в центре электродов, а  $C_1$  и  $C_2$  имеют одинаковое значение.

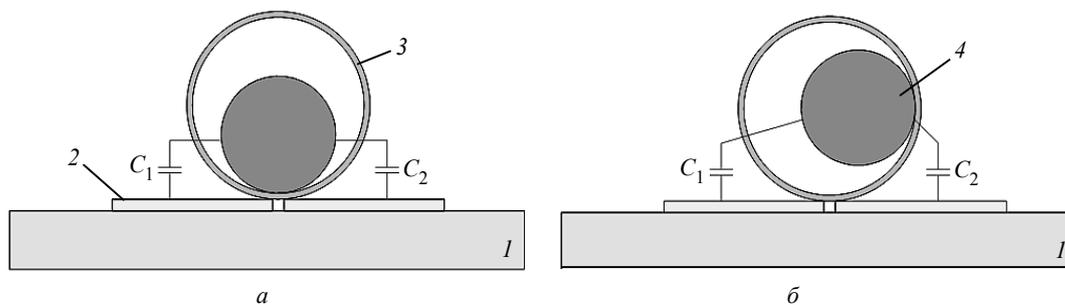


Рис. 12. Принцип работы емкостного датчика угла наклона: а –  $0^\circ$ ; б –  $90^\circ$ ; 1 – стеклянная подложка;

2 – электрод; 3 – пластиковая трубка; 4 – металлический шарик

Fig. 12. Principle of operation of the capacitive tilt angle sensor: а –  $0^\circ$ ; б –  $90^\circ$ ; 1 – glass substrate; 2 – electrode; 3 – plastic tube; 4 – metal ball

Значения емкостей  $C_1$  и  $C_2$  различаются при наклоне датчика на  $90^\circ$ . Расстояние между электродами и металлическим шариком увеличивается одновременно. Таким образом, емкости  $C_1$  и  $C_2$  уменьшаются, что приводит к уменьшению общей емкости в последовательном соединении, как продемонстрировано на рис. 12, б. Общая емкость может быть измерена с использованием лишь двух электродов, следовательно, в этом датчике угла наклона отсутствует физический контакт между электродом и металлическим шариком.

При этом рассматриваемый датчик угла наклона не может определить разницу между положительным и отрицательным наклонами. Чтобы различать эти направления, два электрода в датчике следует заменить четырьмя. Затем измерение угла наклона можно выполнить, подключив эти электроды попарно, что превратило бы четыре маленьких электрода в два больших, как и раньше. Затем необходимо выполнить еще одно измерение знака наклона, после отсоединения двух маленьких электродов друг от друга. Емкость маленьких электродов, расположенных ближе к металлическому шариком, показала бы большее значение, чем у электродов с другой стороны. Различные емкости каждой стороны могут указывать на знак угла наклона.

В последние годы были разработаны микромеханические системы жидкостно-капельных инклинометрических датчиков с каплей ртути в качестве чувствительного элемента, скользящего по кольцевой канавке [89], [90]. Размеры электродов матричного конденсатора, определяющего положение капли в канавке, составляют  $0.5 \times 0.5$  мм, а диаметр самой капли ртути составляет 1.8 мм. Такие датчики могут применяться для измерения угла наклона в достаточно сложных условиях эксплуатации.

**Закключение.** В статье рассмотрены основные физические принципы функционирования и

наиболее интересные из большого числа актуальных разработок в области специализированных инклинометров, предназначенных для измерения углов наклона с высокой производительностью и малым энергопотреблением. Такие датчики используют свободную массу (твердотельную, жидкостную или газовую), которая приводится в движение под действием гравитационных сил. Для измерения реакции свободной массы на силу тяжести в основном используются резистивные, емкостные, индуктивные, магнитные, волоконно-

оптические и оптические методы. Необходимо отметить, что принятая в работе классификация датчиков весьма условна и такие приборы могут быть охарактеризованы как по типу используемой свободной массы, так и по методу контроля ее перемещения или же сочетанию этих двух факторов. Следует подчеркнуть, что для большинства технических задач более простой и доступной в реализации альтернативой служит измерение углов наклона с помощью электронных акселерометров и гироскопов.

#### Список литературы

1. Биндер Я. И. Актуальные вопросы построения и использования непрерывных гироскопических инклинометров // Каротажник. 2011, № 12. С. 97–119.
2. Арсланов И. Г., Ягафарова Х. Н. Особенности применения непрерывных гироскопических инклинометров // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2018, № 5. С. 16–19. doi: 10.30713/1999-6934-2018-5-16-19.
3. Precaution and early warning of surface failure of slopes using tilt sensors / T. Uchimura, I. Towhata, L. Wang, S. Nishie, H. Yamaguchi, I. Seko, J. Qiao // Soils and Foundations. 2015. Vol. 55, no. 5. P. 1086–1099. doi: 10.1016/j.sandf.2015.09.010.
4. Arenson L., Hoelzle M., Springman S. Borehole deformation measurements and internal structure of some rock glaciers in Switzerland // Permafrost and Periglacial Processes. 2002. Vol. 13, no. 2. P. 117–135. doi: 10.1002/ppp.414.
5. Stark T. D., Choi H. Slope inclinometers for landslides // Landslides. 2008. Vol. 5, no. 3. P. 339–350. doi: 10.1007/s10346-008-0126-3.
6. Jeng C. J., Yo Y. Y., Zhong K. L. Interpretation of slope displacement obtained from inclinometers and simulation of calibration tests // Natural Hazards. 2017. Vol. 87, no. 2. P. 623–657. doi: 10.1007/s11069-017-2786-6.
7. Kinematics, triggers and mechanism of Majiagou landslide based on FBG real-time monitoring / L. Zhang, B. Shi, D. Zhang, Y. Sun, H. I. Inyang // Environmental Earth Sci. 2020. Vol. 79. P. 200. doi: 10.1007/s12665-020-08940-5.
8. A multi-module fixed inclinometer for continuous monitoring of landslides: Design, development, and laboratory testing / G. Ruzza, L. Guerriero, P. Revellino, F. M. Guadagno // Sensors. 2020. Vol. 20, no. 11. P. 3318. doi: 10.3390/s20113318.
9. Advances on measuring deep-seated ground deformations using robotized inclinometer system / P. Allasia, D. Godone, D. Giordan, D. Guenzi, G. Lollino // Sensors. 2020. Vol. 20, no. 13. P. 3769. doi: 10.3390/s20133769.
10. Skulich M. The concept of applying the shaft inclinometer in verticality and rectilinearity measurements of shaft guides // Geomatics and Environmental Engin. 2008. No. 2/1. P. 67–76.
11. Биндер Я. И., Падерина Т. В., Розенцвейн В. Г. Высокопроизводительная прецизионная инклинометрическая съемка скважин малого диаметра. Результаты практического внедрения // Гироскопия и навигация. 2009. № 1. С. 52–62.
12. Gormakov A., Kharitonov M., Prygov A. Sensor module for testing magnetometric borehole inclinometers under field conditions // MATEC Web of Conf. 2017. Vol. 102. P. 01017. doi: 10.1051/mateconf/201710201017.
13. Ghazali M. F., Mohamad H. Monitoring subsurface ground movement using fibre optic inclinometer sensor // IOP Conf. Series: Materials Sci. and Engin. 2019. Vol. 527. P. 012040. doi: 10.1088/1757-899X/527/1/012040.
14. Мобильная инклинометрическая станция на основе микромеханических чувствительных элементов для съемки траекторий стволов группы скважин подземной выработки / Я. И. Биндер, А. Е. Елисеенков, А. С. Лысенко, В. Г. Розенцвейн, В. М. Денисов, Д. А. Соколов // Гироскопия и навигация. 2013. № 1. С. 95–106.
15. A high precision fiber Bragg grating inclination sensor for slope monitoring / H. Xu, F. Li, W. Zhao, S. Wang, Y. Du, C. Bian // J. of Sensors. 2019. Vol. 2019. P. 1354029. doi: 10.1155/2019/1354029.
16. Алексейченко А. А., Вереникина Н. М., Пономарев А. П. Инклинометр на базе трех лазерных гироскопов // Контентант. 2018. Т. 17, № 3. С. 55–62.
17. Громов Д. С., Шарков А. В. Тепловые режимы гироскопических приборов на базе волоконно-оптических гироскопов // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 1. С. 62–67.
18. Кострин Д. К., Лисенков А. А., Ухов А. А. Электронные средства контроля технологических процессов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 228 с.
19. Kumar A. S. A., George B., Mukhopadhyay S. C. Technologies and applications of angle sensors: A review // IEEE Sensors J. 2021. Vol. 21, no. 6. P. 7195–7206. doi: 10.1109/JSEN.2020.3045461.
20. Wei S., Jingqia F. The study of variable sensitivity in dual-axis tilt sensor // Procedia Engin. 2012. Vol. 29. P. 2605–2609. doi: 10.1016/j.proeng.2012.01.359.
21. Luczak S. Novel algorithm for tilt measurements using MEMS accelerometers // MATEC Web of Conf.

2018. Vol. 157. P. 08005. doi: 10.1051/mateconf/201815708005.

22. Чекасин А. И. Анализ влияния и учет нелинейности характеристики MEMS-акселерометров при разработке инклинометров // Актуальные проблемы современной науки. 2010. № 4. С. 201–205.

23. Власенко А. Инклинометр на базе микроконвертора ADuC845 и акселерометра ADXL103 фирмы Analog Devices // Компоненты и технологии. 2006. № 6. С. 158–160.

24. Бузыкканов С. Датчик наклона на основе твердотельного акселерометра // Современная электроника. 2004. № 2. С. 42–45.

25. A novel single-axis mems tilt sensor with a high sensitivity in the measurement range from 0 to 360° / S. Wang, X. Wei, Y. Weng, Y. Zhao, Z. Jiang // Sensors. 2018. Vol. 18, no. 2. P. 346. doi: 10.3390/s18020346.

26. Luczak S., Oleksiuk W., Bodnicki M. Sensing tilt with MEMS accelerometers // IEEE Sensor J. 2006. Vol. 6, no 6. P. 1669–1675. doi: 10.1109/JSEN.2006.881433.

27. A wireless MEMS-based inclinometer sensor node for structural health monitoring / D. W. Ha, H. S. Park, S. W. Choi, Y. Kim // Sensors. 2013. Vol. 13, no. 12. P. 16090–16104. doi: 10.3390/s131216090.

28. Constandinou T. G., Georgiou J. A micropower tilt processing circuit // Proc. of the 2008 IEEE Biomed. Circuits and Systems Conf., Baltimore, 2008. P. 197–200. doi: 10.1109/BIOCAS.2008.4696908.

29. Chen J. High precision digital inclinometer based on over sampling theory // IOP Conf. Series: Materials Sci. and Engin. 2018. Vol. 452, no. 4. P. 042036. doi: 10.1088/1757-899X/452/4/042036.

30. Sensor fusion for structural tilt estimation using an acceleration-based tilt sensor and a gyroscope / C. Liu, J.-W. Park, B. F. Spencer Jr., D.-S. Moon, J. Fan // Smart Materials and Structures. 2017. Vol. 26, no. 10. P. 105005. doi: 10.1088/1361-665X/aa84a0.

31. A novel wireless low-cost inclinometer made from combining the measurements of multiple MEMS gyroscopes and accelerometers / S. Komarizadehasl, M. Komary, A. Alahmad, J. A. Lozano-Galant, G. Ramos, J. Turmo // Sensors. 2022. Vol. 22, no. 15. P. 5605. doi: 10.3390/s22155605.

32. Zega V., Comi C., Corigliano A. Integrated structure for a resonant micro-gyroscope and accelerometer // Frattura ed Integrita Strutturale. 2014. Vol. 8, no. 29. P. 334–342. doi: 10.3221/IGF-ESIS.29.29.

33. Кострин Д. К., Ухов А. А. Датчики в электронных устройствах. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 240 с.

34. Han Q., Chen C. Research on Tilt Sensor Technology // Proc. of the 2008 IEEE Intern. Symp. on Knowledge Acquisition and Modeling Workshop, Wuhan, 2008. P. 786–789. doi: 10.1109/KAMW.2008.4810608.

35. Исследование и разработка технологии лазерного конфигурирования сердечников феррозондовых инклинометров / О. С. Юльметова, О. Н. Послянова, А. Г. Щербак, М. В. Жуков // Вопр. материал-

ведения. 2019. № 1. С. 85–93. doi: 10.22349/1994-6716-2019-97-1-85-94.

36. Luczak S., Ekwinska M. Electric-contact tilt sensors: A review // Sensors. 2021. Vol. 21, no. 4. P. 1097. doi: 10.3390/s21041097.

37. Lee J. H., Lee S. S. Electrolytic tilt sensor fabricated by using electroplating process // Sensors and Actuators A: Physical. 2011. Vol. 167, no. 1. P. 1–7. doi: 10.1016/j.sna.2011.01.011.

38. Cheung Y.-K., Yu H. An Electrochemical tilt sensor with double-band electrodes fabricated by wire winding // Micromachines. 2022. Vol. 13, no 8. P. 1229. doi: 10.3390/mi13081229.

39. Baltag O., Costandache D., Salceanu A. Tilt measurement sensor // Sensors and Actuators A: Physical. 2000. Vol. 81, no. 1–3. P. 336–339.

40. Морозова Д. Ю., Сайкин М. С. Разработка магнитоожидкостных датчиков угла наклона с чувствительным элементом на постоянных магнитах // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2014. Т. 16, № 1–2. С. 459–463.

41. Морозова Д. Ю., Сайкин М. С. Магнитоожидкостные датчики угла наклона для летательных аппаратов // Вестн. РГТА им. П. А. Соловьева. 2015. № 2. С. 109–115.

42. Deak J., Jin I. High-field tunneling magnetoresistive angle sensor // IEEE Transactions on Magnetics. 2019. Vol. 55, no. 10. P. 6700104. doi: 10.1109/INTMAG.2018.8508531.

43. Базанов П., Вербов И. Датчики положения в современных системах автоматизации в примерах и иллюстрациях // Компоненты и технологии. 2006. № 7. С. 74–77.

44. A robust two-axis tilt angle sensor based on air/liquid two-phase dielectric capacitive sensing structure / H. T. Thi Thuy, T. D. Dinh, T. Vu Quoc, T. Pham Quoc, M. Aoyagi, M. Bui Ngoc, V. T. Dau, T. T. Bui // IETE J. of Research. 2020. Vol. 66, no. 5. P. 685–696. doi: 10.1080/03772063.2018.1518732.

45. Two-axis tilt angle detection based on dielectric liquid capacitive sensor / T. D. Dinh, T. T. Bui, T. Vu Quoc, T. Pham Quoc, M. Aoyagi, M. Bui Ngoc, T. C. Duc // Proc. of the 15<sup>th</sup> IEEE Sensors Conf., Orlando, 2016. P. 1–3. doi: 10.1109/ICSENS.2016.7808708.

46. Jung H., Kim C. J., Kong S. H. An optimized MEMS-based electrolytic tilt sensor // Sensors and Actuators A: Physical. 2007. Vol. 139, no. 1–2. P. 23–30. doi: 10.1016/j.sna.2006.10.059.

47. Ando B., Ascia A., Baglio S. A ferrofluidic inclinometer in the resonant configuration // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2009. Vol. 59, no 3. P. 558–564. doi: 10.1109/TIM.2009.2024705.

48. A novel ferrofluidic inclinometer / B. Ando, A. Ascia, S. Baglio, N. Savalli // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2007. Vol. 56, no. 4. P. 1114–1123. doi: 10.1109/TIM.2007.899870.

49. Integrated optics inclinometers for SHM / D. Inaudi, R. Blin, B. Timotijevic, D. Zaman Bayat, Y. Petremand, M. Luetzelschwab, N. Niketic // J. of Nondestructive Testing. 2020. Vol. 25, no. 1. P. 24944.

50. Zhong Z., Zhao L., Lin H. Development and investigation of an optical tilt sensor // *Optics Communications*. 2006. Vol. 261, no. 1. P. 23–28. doi: 10.1016/j.optcom.2005.11.044.
51. Ozturk Y., Dolmen T., Gunes Y. Light guiding medium based optical tilt sensor design // *Am. Scientific Research J. for Engin., Technol. and Sci.* 2017. Vol. 32, no. 1. P. 282–288.
52. Das S. A simple, low cost optical tilt sensor // *Intern. J. of Electronics and Elect. Engin.* 2014. Vol. 2, no. 3. P. 235–241. doi: 10.12720/ijeee.2.3.235-241.
53. Optical sensors for real-time measurement of motorcycle tilt angle / M. Norgia, I. Boniolo, M. Tanelli, S. M. Savaresi, C. Svelto // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2009. Vol. 58, no. 5. P. 1640–1649. doi: 10.1109/TIM.2008.2009421.
54. Accuracy and functional assessment of an original low-cost fibre-based inclinometer designed for structural monitoring / K. Cmielewski, K. Karsznia, J. Kuchmister, P. Goluch, I. Wilczynska // *Open Geosciences*. 2020. Vol. 12, no. 1. P. 1052–1059. doi: 10.1515/geo-2020-0171.
55. Chen H.-J., Wang L., Liu W. F. Temperature-insensitive fiber Bragg grating tilt sensor // *Appl. Optics*. 2008. Vol. 47, no. 4. P. 556–560. doi: 10.1364/AO.47.000556.
56. Simultaneous measurement of tilt angle and temperature with pendulum-based fiber Bragg grating sensor / R. Yang, H. Bao, S. Zhang, K. Ni, Y. Zheng, X. Dong // *IEEE Sensors J.* 2015. Vol. 15, no. 11. P. 6381–6384. doi: 10.1109/JSEN.2015.2458894.
57. Chang H.-Y., Chang Y.-C., Liu W.-F. A highly sensitive two-dimensional inclinometer based on two etched chirped-fiber-grating arrays // *Sensors*. 2017. Vol. 17, no. 12. P. 2922. doi: 10.3390/s17122922.
58. A rotation independent in-place inclinometer/tilt sensor based on fiber Bragg grating / M. Maheshwari, Y. Yang, D. Upadrashta, T. Chaturvedi // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2019. Vol. 68, no. 8. P. 2943–2953. doi: 10.1109/TIM.2018.2870246.
59. Pei H.-F., Yin J.-H., Jin W. Development of novel optical fiber sensors for measuring tilts and displacements of geotechnical structures // *Measurement Sci. and Technol.* 2013. Vol. 24, no. 9. P. 095202. doi: 10.1088/0957-0233/24/9/095202.
60. A simple, low-cost, high-sensitivity fiber-optic tilt sensor / J. S. Bajic, D. Z. Stupar, L. M. Manojlovic, M. P. Slankamenac, M. B. Zivanov // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2012. Vol. 185. P. 33–38. doi: 10.1016/j.sna.2012.07.027.
61. An ultrasensitive flexible and bending sensor for detecting angle and micro-force / Y. Chen, S. Guo, Y. Xiong, L. Hao // *Proc. of the 4<sup>th</sup> Intern. Conf. on Sensors, Measurement and Intelligent Materials, Shenzhen*, 2015. P. 32–36. doi: 10.2991/icsmim-15.2016.7.
62. Tang Y., Chen C. Design of omni-directional tilt sensor based on machine vision // *J. of Sensor Technol.* 2011. Vol. 1, no. 4. P. 108–115. doi: 10.4236/jst.2011.14015.
63. Zhou J.-H., Wu J.-Z., Xu M.-Q. The micro tilt sensors of image-based identification // *Automation*. 2006. Vol. 27, no. 11. P. 39–44.
64. Digital inclinometer for joint angles measurements with a real-time 3D-animation / M. Zabat, N. Ouadahi, A. Youyou, A. Ababou, N. Ababou // *12<sup>th</sup> IEEE Intern. Multi-Conf. on Systems, Signals and Devices, Mahdia*, 2015. P. 1–6. doi: 10.1109/SSD.2015.7348258.
65. The omni-directional electronic level structure and measuring analysis principle / C.-T. Wang, E.-H. Yang, J.-G. Zhang, Y.-X. Ma, B. Zhang // *J. of Scientific Instrument*. 2006. Vol. 27, no. 2. P. 183–185.
66. Исследование точности определения положения объекта с применением оптико-электронной системы наблюдения / Н. С. Морев, Д. К. Кострин, В. А. Симон, А. А. Ухов // *Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2019. № 2. С. 5–10.
67. Kostrin D. K., Simon V. A., Uhov A. A. Application of an automated optoelectronic system for determining position of an object // *Proc. of the 2019 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Elect. and Electronic Engin., Saint-Petersburg*, 2019. P. 105–109. doi: 10.1109/EIConRus.2019.8656768.
68. Novel 3D-printed biaxial tilt sensor based on fiber Bragg grating sensing approach / N. N. Ismail, A. S. Sharbirin, M. S. M. Sa'ad, M. K. A. Zaini, M. F. Ismail, G. Brambilla, B. M. A. Rahman, K. T. V. Grattan, H. Ahmad // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2021. Vol. 330. P. 112864. doi: 10.1016/j.sna.2021.112864.
69. Kesner S. B., Howe R. D. Design principles for rapid prototyping forces sensors using 3D printing // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2011. Vol. 16, № 5. P. 866–870. doi: 10.1109/TMECH.2011.2160353.
70. A FBG tilt sensor fabricated using 3D printing technique for monitoring ground movement / C. Hong, Y. Zhang, Z. Lu, Z. Yin // *IEEE Sensors J.* 2019. Vol. 19, no. 15. P. 6392–6399. doi: 10.1109/JSEN.2019.2908873.
71. Fiber Bragg gratings embedded in 3D-printed scaffolds / P. C. Liacouras, G. T. Grant, K. Choudhry, G. F. Strouse, Z. Ahmed // *NCSLI Measure*. 2015. Vol. 10, no. 2. P. 50–52. doi: 10.1080/19315775.2015.11721724.
72. 3D-printed tilt sensor based on an embedded two-mode fiber interferometer / A. S. Sharbirin, M. K. A. Zaini, G. Brambilla, B. M. Rahman, K. T. V. Grattan, H. Ahmad // *IEEE Sensors J.* 2021. Vol. 21, no. 6. P. 7565–7571. doi: 10.1109/jsen.2021.3050756.
73. Grating-corner-cube-based roll angle sensor / S. Zhou, V. Le, Q. Mi, G. Wu // *Sensors*. 2020. Vol. 20, no. 19. P. 5524. doi: 10.3390/s20195524.
74. Design of a laser autocollimator-based optical sensor with a rangefinder for error correction of precision slide guideways / S. L. Tan, Y. Shimizu, T. Meguro, S. Ito, W. Gao // *Intern. J. of Precision Engin. and Manufacturing*. 2015. Vol. 16. P. 423–431. doi: 10.1007/s12541-015-0058-5.
75. A three-axis autocollimator for detection of angular error motions of a precision stage / W. Gao, Y. Saito, H. Muto, Y. Arai, Y. Shimizu // *CIRP Annals*. 2011. Vol. 60, no 1. P. 515–518. doi: 10.1016/j.cirp.2011.03.052.

76. A liquid-surface-based three-axis inclination sensor for measurement of stage tilt motions / Y. Shimizu, S. Kataoka, T. Ishikawa, Y.-L. Chen, X. Chen, H. Matsukuma, W. Gao // *Sensors*. 2018. Vol. 18, no. 2. P. 398. doi: 10.3390/s18020398.
77. Constandinou T. G., Georgiou J., Andreou C. An ultra-low-power micro-optoelectromechanical tilt sensor // *Proc. of the 2008 IEEE Intern. Symp. on Circuits and Systems, Seattle, 2008*. P. 3158–3161. doi: 10.1109/ISCAS.2008.4542128.
78. Разработка терморегулятора для электронных устройств уличного исполнения / А. А. Ухов, В. А. Герасимов, Л. М. Селиванов, Д. К. Кострин, В. А. Симон // *Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2018. № 9. С. 5–11.
79. Thermoregulator for biomedical electronic devices used in conditions of negative air temperatures / A. A. Uhov, V. A. Gerasimov, L. M. Selivanov, D. K. Kostrin, V. A. Simon // *AIP Conf. Proc.* 2023. Vol. 2726. P. 020025. doi: 10.1063/5.0134261.
80. Sensitivity improvement of MEMS-based tilt sensor using air medium / D. W. Jung, J. C. Choi, J. K. Lee, H. Jung, S. H. Kong // *Proc. of the 8<sup>th</sup> IEEE Sensors Conf., Christchurch, 2009*. P. 164–167. doi: 10.1109/ICSENS.2009.5398205.
81. Dual-axis thermal convective inclinometer based on CNT/PDMS composite / S. Zhang, C. Chen, W. Bin, X. Zheng, H. San, W. Hofmann // *J. of Materials Sci.: Materials in Electronics*. 2018. Vol. 29. P. 18997–19004. doi: 10.1007/s10854-018-0025-x.
82. Micromachined inclinometer with high sensitivity and very good stability / S. Billat, H. Glosch, M. Kunze, F. Hedrich, J. Frech, J. Auber, H. Sandmaier, W. Wimmer, W. Lang // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2002. Vol. 97–98. P. 125–130. doi: 10.1016/S0924-4247(01)00824-X.
83. Khan S. M., Qaiser N., Hussain M. M. An inclinometer using movable electrode in a parallel plate capacitive structure // *AIP Advances*. 2019. Vol. 9, no. 4. P. 045118. doi: 10.1063/1.5092146.
84. Brettertklieber T., Zangl H., Brasseur G. Impacts on the accuracy of a capacitive inclination sensor // *Proc. of the 21<sup>st</sup> IEEE Instrumentation and Measurement Technol. Conf., Como, 2004*. Vol. 3. P. 2315–2319.
85. Fabrication of two-axis quartz MEMS-based capacitive tilt sensor / J. X. Liang, T. Matsuo, F. Kohsaka, X. Li, K. Kunitomo, T. Ueda // *IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines*. 2008. Vol. 128, no. 3. P. 85–90. doi: 10.1541/ieejsmas.128.85.
86. A capacitive MEMS inclinometer sensor with wide dynamic range and improved sensitivity / H. Xu, Y. Zhao, K. Zhang, K. Jiang // *Sensors*. 2020. Vol. 20, no. 13. P. 3711. doi: 10.3390/s20133711.
87. Емкостной датчик контроля обледенения поверхности / А. А. Ухов, Д. К. Кострин, В. А. Герасимов, Л. М. Селиванов, В. А. Симон // *Контроль. Диагностика*. 2023. № 5. С. 50–55. doi: 10.14489/td.2023.05.pp.050-055.
88. Lee C. H., Lee S. S. Study of capacitive tilt sensor with metallic ball // *ETRI J.* 2014. Vol. 36, no. 3. P. 361–366. doi: 10.4218/etrij.14.0113.0671.
89. Design of a capacitive MEMS accelerometer with softened beams / C. Wang, Y. Hao, Z. Sun, L. Zu, W. Yuan, H. Chang // *Micromachines*. 2022. Vol. 13, no. 3. P. 459. doi: 10.3390/mi13030459.
90. Oh J. H., Oh D. Y., Lee S. S. Development of mercury drop tilt sensor using MEMS technology // *Korean Society of Precision Engin.* 2000. Vol. 17, no. 8. P. 120–125.

### Информация об авторе

**Кострин Дмитрий Константинович** – д-р техн. наук, доцент кафедры электронных приборов и устройств. СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: [dkkostrin@mail.ru](mailto:dkkostrin@mail.ru)

<http://orcid.org/0000-0002-6284-0246>

### References

- Binder Ja. I. Aktual'nye voprosy postroeniya i ispol'zovaniya nepreryvnyh giroinklinometrov // *Karotazhnik*. 2011, № 12. S. 97–119. (In Russ.).
- Arslanov I. G., Jagafarova H. N. Osobennosti primeneniya nepreryvnyh giroskopicheskikh inklinometrov // *Oborudovanie i tehnologii dlja neftegazovogo kompleksa*. 2018, № 5. S. 16–19. doi: 10.30713/1999-6934-2018-5-16-19. (In Russ.).
- Precaution and early warning of surface failure of slopes using tilt sensors / T. Uchimura, I. Towhata, L. Wang, S. Nishie, H. Yamaguchi, I. Seko, J. Qiao // *Soils and Foundations*. 2015. Vol. 55, no. 5. P. 1086–1099. doi: 10.1016/j.sandf.2015.09.010.
- Arenson L., Hoelzle M., Springman S. Borehole deformation measurements and internal structure of some rock glaciers in Switzerland // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2002. Vol. 13, no. 2. P. 117–135. doi: 10.1002/ppp.414.
- Stark T. D., Choi H. Slope inclinometers for landslides // *Landslides*. 2008. Vol. 5, no. 3. P. 339–350. doi: 10.1007/s10346-008-0126-3.
- Jeng C. J., Yo Y. Y., Zhong K. L. Interpretation of slope displacement obtained from inclinometers and simulation of calibration tests // *Natural Hazards*. 2017. Vol. 87, no. 2. P. 623–657. doi: 10.1007/s11069-017-2786-6.
- Kinematics, triggers and mechanism of Majiagou landslide based on FBG real-time monitoring / L. Zhang, B. Shi, D. Zhang, Y. Sun, H. I. Inyang // *Environmental Earth Sci.* 2020. Vol. 79. P. 200. doi: 10.1007/s12665-020-08940-5.

8. A multi-module fixed inclinometer for continuous monitoring of landslides: Design, development, and laboratory testing / G. Ruzza, L. Guerriero, P. Revellino, F. M. Guadagno // *Sensors*. 2020. Vol. 20, no. 11. P. 3318. doi: 10.3390/s20113318.
9. Advances on measuring deep-seated ground deformations using robotized inclinometer system / P. Alasia, D. Godone, D. Giordan, D. Guenzi, G. Lollino // *Sensors*. 2020. Vol. 20, no. 13. P. 3769. doi: 10.3390/s20133769.
10. Skulich M. The concept of applying the shaft inclinometer in verticality and rectilinearity measurements of shaft guides // *Geomatics and Environmental Engin.* 2008. No. 2/1. P. 67–76.
11. Binder Ja. I., Paderina T. V., Rozencvejn V. G. Vysokoproizvoditel'naja precizionnaja inklinometricheskaja s#emka skvazhin malogo diametra. Rezul'taty prakticheskogo vnedrenija // *Giroskopija i navigacija*. 2009. № 1. S. 52–62. (In Russ.).
12. Gormakov A., Kharitonov M., Prygov A. Sensor module for testing magnetometric borehole inclinometers under field conditions // *MATEC Web of Conf.* 2017. Vol. 102. P. 01017. doi: 10.1051/mateconf/201710201017.
13. Ghazali M. F., Mohamad H. Monitoring subsurface ground movement using fibre optic inclinometer sensor // *IOP Conf. Series: Materials Sci. and Engin.* 2019. Vol. 527. P. 012040. doi: 10.1088/1757-899X/527/1/012040.
14. Mobil'naja inklinometricheskaja stancija na osnove mikromehaničeskikh čuvstvitel'nyh jelementov dlja s#emki traektorij stvolov gruppy skvazhin podzemnoj vyrabotki / Ja. I. Binder, A. E. Eliseenkov, A. S. Lysenko, V. G. Rozencvejn, V. M. Denisov, D. A. Sokolov // *Giroskopija i navigacija*. 2013. № 1. S. 95–106. (In Russ.).
15. A high precision fiber Bragg grating inclination sensor for slope monitoring / H. Xu, F. Li, W. Zhao, S. Wang, Y. Du, C. Bian // *J. of Sensors*. 2019. Vol. 2019. P. 1354029. doi: 10.1155/2019/1354029.
16. Aleksejchenko A. A., Verenikina N. M., Ponomarev A. P. Inklinometr na baze treh lazernyh giroskopov // *Konenant*. 2018. T. 17, № 3. S. 55–62. (In Russ.).
17. Gromov D. S., Sharkov A. V. Teplovyje rezhimy giroskopicheskikh priborov na baze volokonno-optičeskikh giroskopov // *Izv. vuzov. Priborostroenie*. 2013. T. 56, № 1. S. 62–67. (In Russ.).
18. Kostrin D. K., Lisenkov A. A., Uhov A. A. Jelektronnyje sredstva kontrolja tehnologičeskikh processov. SPb.: Izd-vo SPbGJeTU «LJeTI», 2016. 228 s. (In Russ.).
19. Kumar A. S. A., George B., Mukhopadhyay S. C. Technologies and applications of angle sensors: A review // *IEEE Sensors J.* 2021. Vol. 21, no. 6. P. 7195–7206. doi: 10.1109/JSEN.2020.3045461.
20. Wei S., Jingqia F. The study of variable sensitivity in dual-axis tilt sensor // *Procedia Engin.* 2012. Vol. 29. P. 2605–2609. doi: 10.1016/j.proeng.2012.01.359.
21. Luczak S. Novel algorithm for tilt measurements using MEMS accelerometers // *MATEC Web of Conf.* 2018. Vol. 157. P. 08005. doi: 10.1051/mateconf/201815708005.
22. Chekasin A. I. Analiz vlijanija i uchet nelinejnosti harakteristiki MEMS-akselerometrov pri razrabotke inklinometrov // *Aktual'nye problemy sovremennoj nauki*. 2010. № 4. S. 201–205. (In Russ.).
23. Vlasenko A. Inklinometr na baze mikrokonvertora ADuC845 i akselerometra ADXL103 firmy Analog Devices // *Komponenty i tehnologii*. 2006. № 6. S. 158–160. (In Russ.).
24. Buzykanov S. Datchik naklona na osnove tverdotel'nogo akselerometra // *Sovremennaja jelektronika*. 2004. № 2. S. 42–45. (In Russ.).
25. A novel single-axis mems tilt sensor with a high sensitivity in the measurement range from 0 to 360° / S. Wang, X. Wei, Y. Weng, Y. Zhao, Z. Jiang // *Sensors*. 2018. Vol. 18, no. 2. P. 346. doi: 10.3390/s18020346.
26. Luczak S., Oleksiuk W., Bodnicki M. Sensing tilt with MEMS accelerometers // *IEEE Sensor J.* 2006. Vol. 6, no 6. P. 1669–1675. doi: 10.1109/JSEN.2006.881433.
27. A wireless MEMS-based inclinometer sensor node for structural health monitoring / D. W. Ha, H. S. Park, S. W. Choi, Y. Kim // *Sensors*. 2013. Vol. 13, no. 12. P. 16090–16104. doi: 10.3390/s131216090.
28. Constantinou T. G., Georgiou J. A micropower tilt processing circuit // *Proc. of the 2008 IEEE Biomed. Circuits and Systems Conf., Baltimore*, 2008. P. 197–200. doi: 10.1109/BIOCAS.2008.4696908.
29. Chen J. High precision digital inclinometer based on over sampling theory // *IOP Conf. Series: Materials Sci. and Engin.* 2018. Vol. 452, no. 4. P. 042036. doi: 10.1088/1757-899X/452/4/042036.
30. Sensor fusion for structural tilt estimation using an acceleration-based tilt sensor and a gyroscope / C. Liu, J.-W. Park, B. F. Spencer Jr., D.-S. Moon, J. Fan // *Smart Materials and Structures*. 2017. Vol. 26, no. 10. P. 105005. doi: 10.1088/1361-665X/aa84a0.
31. A novel wireless low-cost inclinometer made from combining the measurements of multiple MEMS gyroscopes and accelerometers / S. Komarizadehasl, M. Komary, A. Alahmad, J. A. Lozano-Galant, G. Ramos, J. Turmo // *Sensors*. 2022. Vol. 22, no. 15. P. 5605. doi: 10.3390/s22155605.
32. Zega V., Comi C., Corigliano A. Integrated structure for a resonant micro-gyroscope and accelerometer // *Frattura ed Integrita Strutturale*. 2014. Vol. 8, no. 29. P. 334–342. doi: 10.3221/IGF-ESIS.29.29.
33. Kostrin D. K., Uhov A. A. Datchiki v jelektronnyh ustrojstvah. SPb.: Izd-vo SPbGJeTU «LJeTI», 2013. 240 s. (In Russ.).
34. Han Q., Chen C. Research on tilt sensor technology // *Proc. of the 2008 IEEE Intern. Symp. on Knowledge Acquisition and Modeling Workshop, Wuhan*, 2008. P. 786–789. doi: 10.1109/KAMW.2008.4810608.
35. Issledovanie i razrabotka tehnologii lazernogo konfigurirovanija serdečnikov ferrozondovyh inklinometrov / O. S. Jul'metova, O. N. Posljanova, A. G. Shherbak, M. V. Zhukov // *Voprosy materialovedenija*. 2019. № 1. S. 85–93. doi: 10.22349/1994-6716-2019-97-1-85-94. (In Russ.).

36. Luczak S., Ekwinska M. Electric-contact tilt sensors: A review // *Sensors*. 2021. Vol. 21, no. 4. P. 1097. doi: 10.3390/s21041097.
37. Lee J. H., Lee S. S. Electrolytic tilt sensor fabricated by using electroplating process // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2011. Vol. 167, no. 1. P. 1–7. doi: 10.1016/j.sna.2011.01.011.
38. Cheung Y.-K., Yu H. An electrochemical tilt sensor with double-band electrodes fabricated by wire winding // *Micromachines*. 2022. Vol. 13, no. 8. P. 1229. doi: 10.3390/mi13081229.
39. Baltag O., Costandache D., Salceanu A. Tilt measurement sensor // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2000. Vol. 81, no. 1–3. P. 336–339.
40. Morozova D. Ju., Sajkin M. S. Razrabotka magnitohidkostnyh datchikov ugla naklona s chuvstvitel'nym jelementom na postojannyh magnitah // *Izv. Samarskogo nauch. centra RAN*. 2014. T. 16, № 1–2. S. 459–463. (In Russ.).
41. Morozova D. Ju., Sajkin M. S. Magnitohidkostnye datchiki ugla naklona dlja letatel'nyh apparatov // *Vestn. RGATA im. P. A. Solov'eva*. 2015. № 2. S. 109–115. (In Russ.).
42. Deak J., Jin I. High-field tunneling magnetoresistive angle sensor // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2019. Vol. 55, no. 10. P. 6700104. doi: 10.1109/INTMAG.2018.8508531.
43. Bazanov P., Verbov I. Datchiki polozhenija v sovremennyh sistemah avtomatizacii v primerah i illjustracijah // *Komponenty i tehnologii*. 2006. № 7. S. 74–77. (In Russ.).
44. A robust two-axis tilt angle sensor based on air/liquid two-phase dielectric capacitive sensing structure / H. T. Thi Thuy, T. D. Dinh, T. Vu Quoc, T. Pham Quoc, M. Aoyagi, M. Bui Ngoc, V. T. Dau, T. T. Bui // *IETE J. of Research*. 2020. Vol. 66, no. 5. P. 685–696. doi: 10.1080/03772063.2018.1518732.
45. Two-axis tilt angle detection based on dielectric liquid capacitive sensor / T. D. Dinh, T. T. Bui, T. Vu Quoc, T. Pham Quoc, M. Aoyagi, M. Bui Ngoc, T. C. Duc // *Proc. of the 15<sup>th</sup> IEEE Sensors Conf., Orlando, 2016*. P. 1–3. doi: 10.1109/ICSENS.2016.7808708.
46. Jung H., Kim C. J., Kong S. H. An optimized MEMS-based electrolytic tilt sensor // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2007. Vol. 139, no. 1–2. P. 23–30. doi: 10.1016/j.sna.2006.10.059.
47. Ando B., Ascia A., Baglio S. A ferrofluidic inclinometer in the resonant configuration // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2009. Vol. 59, no 3. P. 558–564. doi: 10.1109/TIM.2009.2024705.
48. A novel ferrofluidic inclinometer / B. Ando, A. Ascia, S. Baglio, N. Savalli // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2007. Vol. 56, no. 4. P. 1114–1123. doi: 10.1109/TIM.2007.899870.
49. Integrated optics inclinometers for SHM / D. Inaudi, R. Blin, B. Timotijevic, D. Zaman Bayat, Y. Petremand, M. Luetzelschwab, N. Niketic // *J. of Nondestructive Testing*. 2020. Vol. 25, no. 1. P. 24944.
50. Zhong Z., Zhao L., Lin H. Development and investigation of an optical tilt sensor // *Optics Communications*. 2006. Vol. 261, no. 1. P. 23–28. doi: 10.1016/j.optcom.2005.11.044.
51. Ozturk Y., Dolmen T., Gunes Y. Light guiding medium based optical tilt sensor design // *Am. Scientific Research J. for Engin., Technol. and Sci*. 2017. Vol. 32, no. 1. P. 282–288.
52. Das S. A simple, low cost optical tilt sensor // *Intern. J. of Electronics and Electr. Engin*. 2014. Vol. 2, no. 3. P. 235–241. doi: 10.12720/ijeee.2.3.235-241.
53. Optical sensors for real-time measurement of motorcycle tilt angle / M. Norgia, I. Boniolo, M. Tanelli, S. M. Savaresi, C. Svelto // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2009. Vol. 58, no. 5. P. 1640–1649. doi: 10.1109/TIM.2008.2009421.
54. Accuracy and functional assessment of an original low-cost fibre-based inclinometer designed for structural monitoring / K. Cmielewski, K. Karsznia, J. Kuchmister, P. Goluch, I. Wilczynska // *Open Geosciences*. 2020. Vol. 12, no. 1. P. 1052–1059. doi: 10.1515/geo-2020-0171.
55. Chen H.-J., Wang L., Liu W. F. Temperature-insensitive fiber Bragg grating tilt sensor // *Appl. Optics*. 2008. Vol. 47, no. 4. P. 556–560. doi: 10.1364/AO.47.000556.
56. Simultaneous measurement of tilt angle and temperature with pendulum-based fiber Bragg grating Sensor / R. Yang, H. Bao, S. Zhang, K. Ni, Y. Zheng, X. Dong // *IEEE Sensors J*. 2015. Vol. 15, no. 11. P. 6381–6384. doi: 10.1109/JSEN.2015.2458894.
57. Chang H.-Y., Chang Y.-C., Liu W.-F. A highly sensitive two-dimensional inclinometer based on two etched chirped-fiber-grating arrays // *Sensors*. 2017. Vol. 17, no. 12. P. 2922. doi: 10.3390/s17122922.
58. A rotation independent in-place inclinometer/ tilt sensor based on fiber Bragg grating / M. Maheshwari, Y. Yang, D. Upadrashta, T. Chaturvedi // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2019. Vol. 68, no. 8. P. 2943–2953. doi: 10.1109/TIM.2018.2870246.
59. Pei H.-F., Yin J.-H., Jin W. Development of novel optical fiber sensors for measuring tilts and displacements of geotechnical structures // *Measurement Sci. and Technol*. 2013. Vol. 24, no. 9. P. 095202. doi: 10.1088/0957-0233/24/9/095202.
60. A simple, low-cost, high-sensitivity fiber-optic tilt sensor / J. S. Bajic, D. Z. Stupar, L. M. Manojlovic, M. P. Slankamenac, M. B. Zivanov // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2012. Vol. 185. P. 33–38. doi: 10.1016/j.sna.2012.07.027.
61. An ultrasensitive flexible and bending sensor for detecting angle and micro-force / Y. Chen, S. Guo, Y. Xiong, L. Hao // *Proc. of the 4<sup>th</sup> Intern. Conf. on Sensors, Measurement and Intelligent Materials, Shenzhen, 2015*. P. 32–36. doi: 10.2991/icsmim-15.2016.7.
62. Tang Y., Chen C. Design of omni-directional tilt sensor based on machine vision // *J. of Sensor Technol*. 2011. Vol. 1, no. 4. P. 108–115. doi: 10.4236/jst.2011.14015.
63. Zhou J.-H., Wu J.-Z., Xu M.-Q. The micro tilt sensors of image-based identification // *Automation*. 2006. Vol. 27, no. 11. P. 39–44.

64. Digital inclinometer for joint angles measurements with a real-time 3D-animation / M. Zabat, N. Ouadahi, A. Youyou, A. Ababou, N. Ababou // 12<sup>th</sup> IEEE Intern. Multi-Conf. on Systems, Signals and Devices, Mahdia, 2015. P. 1–6. doi: 10.1109/SSD.2015.7348258.
65. The omni-directional electronic level structure and measuring analysis principle / C.-T. Wang, E.-H. Yang, J.-G. Zhang, Y.-X. Ma, B. Zhang // J. of Scientific Instrument. 2006. Vol. 27, no. 2. P. 183–185.
66. Issledovanie tochnosti opredelenija polozhenija ob#ekta s primeneniem optiko-jelektronnoj sistemy nabljudenija / N. S. Morev, D. K. Kostrin, V. A. Simon, A. A. Uhov // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2019. № 2. S. 5–10. (In Russ.).
67. Kostrin D. K., Simon V. A., Uhov A. A. Application of an automated optoelectronic system for determining position of an object // Proc. of the 2019 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Elect. and Electronic Engin., Saint-Petersburg, 2019. P. 105–109. doi: 10.1109/EIConRus.2019.8656768.
68. Novel 3D-printed biaxial tilt sensor based on fiber Bragg grating sensing approach / N. N. Ismail, A. S. Sharbirin, M. S. M. Sa'ad, M. K. A. Zaini, M. F. Ismail, G. Brambilla, B. M. A. Rahman, K. T. V. Grattan, H. Ahmad // Sensors and Actuators A: Physical. 2021. Vol. 330. P. 112864. doi: 10.1016/j.sna.2021.112864.
69. Kesner S. B., Howe R. D. Design principles for rapid prototyping force sensors using 3D printing // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2011. Vol. 16, № 5. P. 866–870. doi: 10.1109/TMECH.2011.2160353.
70. A FBG tilt sensor fabricated using 3D printing technique for monitoring ground movement / C. Hong, Y. Zhang, Z. Lu, Z. Yin // IEEE Sensors J. 2019. Vol. 19, no. 15. P. 6392–6399. doi: 10.1109/JSEN.2019.2908873.
71. Fiber Bragg gratings embedded in 3D-printed scaffolds / P. C. Liacouras, G. T. Grant, K. Choudhry, G. F. Strouse, Z. Ahmed // NCSLI Measure. 2015. Vol. 10, no. 2. P. 50–52. doi: 10.1080/19315775.2015.11721724.
72. 3D-printed tilt sensor based on an embedded two-mode fiber interferometer / A. S. Sharbirin, M. K. A. Zaini, G. Brambilla, B. M. A. Rahman, K. T. V. Grattan, H. Ahmad // IEEE Sensors J. 2021. Vol. 21, no. 6. P. 7565–7571. doi: 10.1109/jsen.2021.3050756.
73. Grating-corner-cube-based roll angle sensor / S. Zhou, V. Le, Q. Mi, G. Wu // Sensors. 2020. Vol. 20, no. 19. P. 5524. doi: 10.3390/s20195524.
74. Design of a laser autocollimator-based optical sensor with a rangefinder for error correction of precision slide guideways / S. L. Tan, Y. Shimizu, T. Meguro, S. Ito, W. Gao // Intern. J. of Precision Engin. and Manufacturing. 2015. Vol. 16. P. 423–431. doi: 10.1007/s12541-015-0058-5.
75. A three-axis autocollimator for detection of angular error motions of a precision stage / W. Gao, Y. Saito, H. Muto, Y. Arai, Y. Shimizu // CIRP Annals. 2011. Vol. 60, no 1. P. 515–518. doi: 10.1016/j.cirp.2011.03.052.
76. A liquid-surface-based three-axis inclination sensor for measurement of stage tilt motions / Y. Shimizu, S. Kataoka, T. Ishikawa, Y.-L. Chen, X. Chen, H. Matsu-kuma, W. Gao // Sensors. 2018. Vol. 18, no. 2. P. 398. doi: 10.3390/s18020398.
77. Constandinou T. G., Georgiou J., Andreou C. An ultra-low-power micro-optoelectromechanical tilt sensor // Proc. of the 2008 IEEE Intern. Symp. on Circuits and Systems, Seattle, 2008. P. 3158–3161. doi: 10.1109/ISCAS.2008.4542128.
78. Razrabotka termoreguljatora dlja jelektronnyh ustrojstv ulichnogo ispolnenija / A. A. Uhov, V. A. Gerasimov, L. M. Selivanov, D. K. Kostrin, V. A. Simon // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2018. № 9. S. 5–11. (In Russ.).
79. Thermoregulator for biomedical electronic devices used in conditions of negative air temperatures / A. A. Uhov, V. A. Gerasimov, L. M. Selivanov, D. K. Kostrin, V. A. Simon // AIP Conf. Proc. 2023. Vol. 2726. P. 020025. doi: 10.1063/5.0134261.
80. Sensitivity improvement of MEMS-based tilt sensor using air medium / D. W. Jung, J. C. Choi, J. K. Lee, H. Jung, S. H. Kong // Proc. of the 8<sup>th</sup> IEEE Sensors Conf., Christchurch, 2009. P. 164–167. doi: 10.1109/ICSENS.2009.5398205.
81. Dual-axis thermal convective inclinometer based on CNT/PDMS composite / S. Zhang, C. Chen, W. Bin, X. Zheng, H. San, W. Hofmann // J. of Materials Sci.: Materials in Electronics. 2018. Vol. 29. P. 18997–19004. doi: 10.1007/s10854-018-0025-x.
82. Micromachined inclinometer with high sensitivity and very good stability / S. Billat, H. Glosch, M. Kunze, F. Hedrich, J. Frech, J. Auber, H. Sandmaier, W. Wimmer, W. Lang // Sensors and Actuators A: Physical. 2002. Vol. 97–98. P. 125–130. doi: 10.1016/S0924-4247(01)00824-X.
83. Khan S. M., Qaiser N., Hussain M. M. An inclinometer using movable electrode in a parallel plate capacitive structure // AIP Advances. 2019. Vol. 9, no. 4. P. 045118. doi: 10.1063/1.5092146.
84. Bretterkieber T., Zangl H., Brasseur G. Impacts on the accuracy of a capacitive inclination sensor // Proc. of the 21<sup>st</sup> IEEE Instrumentation and Measurement Technol. Conf., Como, 2004. Vol. 3. P. 2315–2319.
85. Fabrication of two-axis quartz MEMS-based capacitive tilt sensor / J. X. Liang, T. Matsuo, F. Kohsaka, X. Li, K. Kunitomo, T. Ueda // IEEE Transactions on Sensors and Micromachines. 2008. Vol. 128, no. 3. P. 85–90. doi: 10.1541/ieejmas.128.85.
86. A capacitive MEMS inclinometer sensor with wide dynamic range and improved sensitivity / H. Xu, Y. Zhao, K. Zhang, K. Jiang // Sensors. 2020. Vol. 20, no. 13. P. 3711. doi: 10.3390/s20133711.
87. Emkostnoj datchik kontrolja obledeneniya poverhnosti / A. A. Uhov, D. K. Kostrin, V. A. Gerasimov, L. M. Selivanov, V. A. Simon // Kontrol'. Diagnostika. 2023. № 5. S. 50–55. doi: 10.14489/td.2023.05.pp.050-055. (In Russ.).
88. Lee C. H., Lee S. S. Study of capacitive tilt sensor with metallic ball // ETRI J. 2014. Vol. 36, no. 3. P. 361–366. doi: 10.4218/etrij.14.0113.0671.
89. Design of a Capacitive MEMS Accelerometer with Softened Beams / C. Wang, Y. Hao, Z. Sun, L. Zu, W. Yuan, H. Chang // Micromachines. 2022. Vol. 13, no. 3. P. 459. doi: 10.3390/mi13030459.
90. Oh J. H., Oh D. Y., Lee S. S. Development of mercury drop tilt sensor using MEMS technology // Korean Society of Precision Engin. 2000. Vol. 17, no. 8. P. 120–125.

Information about the author

**Dmitry K. Kostrin** – Dr Sci. (Eng.), Assistant Professor of the Department of Electronic Instruments and Devices. Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: [dkkostrin@mail.ru](mailto:dkkostrin@mail.ru)

<http://orcid.org/0000-0002-6284-0246>

Статья поступила в редакцию 27.02.2024; принята к публикации после рецензирования 12.04.2024; опубликована онлайн 21.06.2024.

Submitted 27.02.2024; accepted 12.04.2024; published online 21.06.2024.

---