

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

Научная статья

УДК 622 + 53.087.92

DOI: 10.26730/1999-4125-2026-3-36-46

ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ В ЗАДАЧЕ ОТСЛЕЖИВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

Кизилов Сергей Александрович*, Баловнев Евгений Александрович,
Никитенко Михаил Сергеевич

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук

* для корреспонденции sergkizilov@gmail.com



Информация о статье

Поступила:

30 марта 2026 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 июня 2026 г.

Принята к публикации:

01 июля 2026 г.

Ключевые слова:

механизированная шагающая
крепь, акселерометр,
автоматическая система
управления, угол наклона,
положение в пространстве

Аннотация.

Современный минерально-сырьевой комплекс сталкивается с различными вызовами, обусловленными ухудшением горно-геологических условий и ростом глубины добычи, что может приводить к снижению производительности. В таких условиях критически важным становится внедрение автоматических систем управления горными машинами и оборудованием для обеспечения безопасности и эффективности ведения горных работ. Отслеживание фактических пространственных положений, а также фактических нагрузок на элементы металлоконструкций оборудования тоже остается во многом не решенной задачей. В связи с этим работа посвящена применению массива микроэлектромеханических акселерометров (МЭМС-акселерометров) для одновременного контроля фактического пространственного положения и прогиба балок секций механизированной шагающей крепи. Рассматривается актуальная постановка задачи, связанная с измерением углов наклона элементов оборудования с погрешностью менее 1°, возникающих при работе опорных гидроцилиндров в режиме реального времени. Показаны результаты серии экспериментов по сопоставлению расчетных данных – измерений МЭМС-акселерометрами с референтными значениями, полученными методом прямых измерений. Предложены три способа пересчета угловых величин в проекцию вертикального перемещения контрольных точек на ось ординат и проведено их сравнение. Экспериментально показано, что применение метода МЭМС-инклинометрии обеспечивает достаточную точность для регистрации прогибов балок (погрешность менее 1,5 мм) при углах наклона от 0,14°. Сделан вывод о перспективности внедрения МЭМС-инклинометров в контур управления шагающей крепью для раннего обнаружения нежелательных деформаций и контроля пространственного положения.

Для цитирования: Кизилов С.А., Баловнев Е.А., Никитенко М.С. Применение микроэлектромеханических акселерометров в задаче отслеживания изменения положения конструкций горнодобывающего оборудования // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 3 (175). С. 36-46. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-3-36-46, EDN: JJRCFB

Введение

METHODS AND DEVICES FOR MONITORING AND DIAGNOSTICS OF MATERIALS, PRODUCTS, SUBSTANCES AND THE NATURAL ENVIRONMENT

В настоящий момент минерально-сырьевой комплекс Российской Федерации и других добывающих стран (Китай, Индия, Индонезия, ЮАР и пр.) сталкивается с новыми вызовами [1, 2], связанными с ухудшением горно-геологических условий и увеличением глубины добычи, приводящими к снижению производительности и финансовым потерям [3]. Становится все более актуальной разработка и внедрение автоматизированных машин [4, 5]. Актуализируются подходы, обеспечивающие повышение эффективности и коэффициента готовности оборудования [6].

В ФИЦ УУХ СО РАН разрабатывается механизированная шагающая крепь (далее МШК), обеспечивающая повышение скорости ведения проходческих работ [7]. Конструкция, кинематика и технологии применения МШК ранее были обоснованы в работах [8, 9]. Испытания изготовленных масштабных прототипов МШК показывают, что эффективное и безопасное применение МШК возможно только при наличии автоматической системы управления.

Важной частью системы автоматического управления работы МШК является контроль ее пространственного положения – наклона секций крепи относительно продольной и поперечной осей с целью предупреждения нежелательных деформаций конструкции [4, 10, 11]. При этом МШК как подземная горная машина имеет значительные геометрические размеры и в ходе эксплуатации подвержена большим нагрузкам, что дополнительно актуализирует потребность автоматического контроля наличия прогибов конструктивных элементов для предотвращения их выхода из строя [12]. Поскольку прогиб поверхности конструкции можно интерпретировать как локальное изменение положения точек на поверхности [13], то концептуально изменение формы поверхности конструкции можно отслеживать теми же средствами, что и общий наклон секций МШК.

В современных автоматизированных машинах наклон конструктивных элементов отслеживается с помощью инклинометров, гироскопов и акселерометров, использующих в работе разные физические принципы [14–16]. За счет компактности, простоты использования и низкой стоимости наиболее часто применимыми в горных машинах становятся устройства для измерения угла наклона, изготовленные по МЭМС технологии [17, 18], в частности МЭМС-акселерометры [19].

Наклон секции МШК относительно ее продольной или поперечной оси вызван перемещением в вертикальном направлении одного или нескольких краев секции (а именно положением опорных гидроцилиндров на почве выработки). Соответственно, существует связь

между измеренным значением угла наклона и вертикальным перемещением конструкции. Авторами предложено применение в автоматизированной системе управления МШК массива трехосевых емкостных МЭМС-акселерометров для одновременного определения наклона секций крепи и контроля прогибов конструкций МШК. Установка акселерометров на конструкциях МШК в контрольных точках (КТ) позволит выполнять задачи контроля наклона секций крепи, измерения прогибов балок конструкции и производить косвенную оценку их деформированного состояния.

Применение емкостных МЭМС-акселерометров в качестве устройств контроля положения МШК и прогибов ее элементов потребовало установления инструментальных ограничений при регистрации малых углов наклона и сопоставлении их с требованиями к минимальным значениям измеряемых углов с учетом конструктивных особенностей самой МШК.

Требования к минимальным значениям, измеряемым акселерометром углов наклона, определены из параметров работы опорных гидроцилиндров (скорость выхода и втягивания штока). Исходя из длины опорных балок МШК (6 м) и минимального перемещения опорного гидроцилиндра за время срабатывания клапанов, обеспечивающих управление потоком гидравлической жидкости (0,1 с), расчетное минимальное значение угла наклона продольной оси МШК, которое требуется измерить, составит $0,143^{\circ}$.

Возможность измерения углов наклона с погрешностью более 1° МЭМС-акселерометрами не подвергается сомнению и имеет высокую степень разработанности [18], но в литературе [20, 21] описаны разные причины появления погрешности при измерении угла наклона в $0,4^{\circ}$ – $0,7^{\circ}$ у данного класса устройств.

Для экспериментального исследования точности измерения вертикального перемещения контрольных точек и углов наклона акселерометром с погрешностью менее $0,1^{\circ}$ был разработан специализированный стенд, имитирующий поверхность, создаваемую совокупностью продольных опорных балок МШК (далее стенд). Стенд обеспечивает контролируемый прогиб пластины при нагружении ее краев. Схема и фотография стенда показаны на Рис. 1.

На Рис. 1 цифрами обозначены: 1 – пластина из оцинкованной стали; 2 – реконфигурируемая платформа NI myRIO с трехосевым емкостным акселерометром; 3 – крепежный элемент для реконфигурируемой платформы; 4 – алюминиевые трубки диаметром 8 мм; 5 – поперечная траверса с подвижными

регулируемыми винтовыми опорами; 6 – опорная поверхность; 7 – струбцина.

В качестве упругого элемента, подвергаемого нагружению для стенда, выбрана листовая оцинкованная сталь толщиной 2 мм (поз. 1, Рис. 1). Параметры выбранного материала пластины обеспечивают многократное повторение рабочих циклов нагружения в пределах зоны упругих деформаций, исключая ее повреждение.

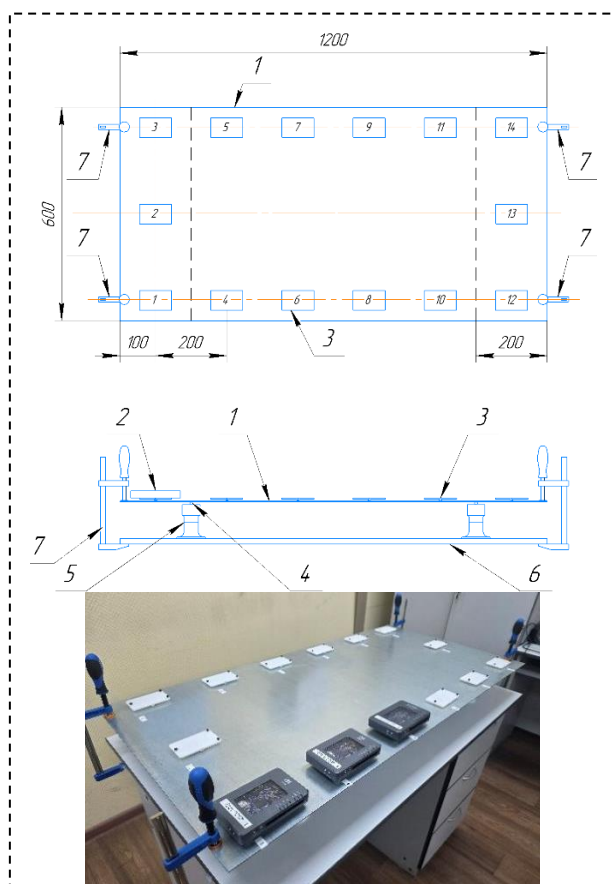


Рис. 1. Схема и фотография стенда
Fig. 1. Diagram and photograph of laboratory stand

Нагружение для контролируемого перемещения краев пластины в ходе экспериментальных исследований производилось с помощью четырех винтовых струбцин (поз. 7, Рис. 1).

Источниками данных об ускорениях в КТ (акселерометров) в стенде являются реконфигурируемые платформы NI myRIO, аппаратное обеспечение которых включает емкостной МЭМС-акселерометр и систему обработки данных с выводом на внешнее устройство через интерфейс USB 2.0. Корпус реконфигурируемой платформы имеет относительно большие размеры 136×86 мм, вследствие чего при прямом креплении к пластине на стенде NI myRIO не позволяет выделить точку, в которой производится

измерение угла наклона. Для локализации контрольной точки при рассмотрении прогибов в процессе нагружения краев пластины разработаны крепежные элементы с быстросъемным креплением для реконфигурируемой платформы NI myRIO (поз. 3, Рис. 1). Ширина контактной поверхности крепежного элемента с пластиной составила 6 мм. Расположение и номер крепежного элемента на Рис. 1 соответствует номеру контрольной точки в дальнейших описаниях результатов экспериментов. К поверхности пластины крепежные элементы неразъемно крепились клеевым соединением.

Для проведения экспериментальных исследований по сопоставлению расчетных прогибов (значений перемещений поверхности пластины в КТ) на основе измеренного акселерометром угла наклона с фактическими значениями при нагружении краев пластины разработаны методика проведения эксперимента и программа сбора данных [22], которая обеспечивает одновременный опрос нескольких реконфигурируемых устройств с пересчетом измеренных акселерометрами значений в углы наклона по методике, описанной в [23].

Целями экспериментальных исследований на стенде являлись:

- определение точности измерения углов наклона менее 1° для выявления минимальных уклонов секций МШК;
- валидация выявленных взаимосвязей между измеренным углом наклона поверхности в КТ и ее перемещения на ось ординат (вертикальным перемещением).

Валидация выявленных взаимосвязей между измеренным углом наклона поверхности в КТ и проекцией ее перемещения на ось ординат выполнялась сопоставлением величин прогиба в КТ, полученных двумя способами:

- расчетным – на основе данных об изменении угла наклона поверхности, измеренного акселерометром;
- прямым (референтным) – с помощью контактного измерения штангенциркулем.

Дополнительной задачей являлось выявление основных ограничений и определение области применимости предлагаемого расчетного метода.

Эксперимент на стенде проводился в два этапа: подготовительного и этапа экспериментальных измерений.

В ходе подготовительного этапа проведена калибровка стенда, созданы карты высот и углов наклона КТ при ненагруженном состоянии пластины.

На стадии экспериментальных измерений производилось ступенчатое нагружение краев пластины струбцинами с шагом в 1 мм. После каждого шага нагружения формировались карты высот и углов наклона КТ. Операции изменения

нагружения повторялись до значения прогиба краев пластины 15 мм. Схема стенда с обозначением измеряемых значений показана на Рис. 2.

Изображенные на Рис. 2 элементы имеют

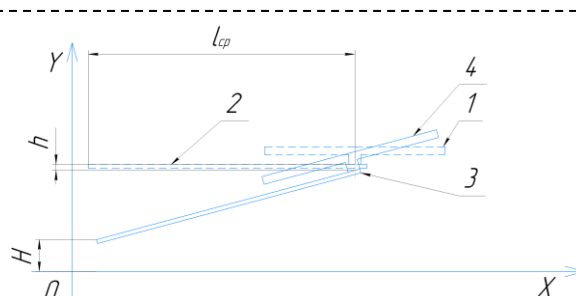


Рис. 2. Схема стенда с обозначением измеряемых значений

Fig. 2. Diagram of the stand with the designation of the measured values

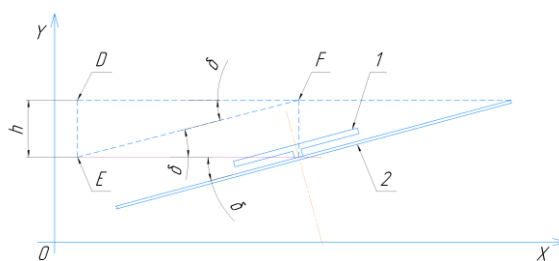


Рис. 3. Прямоугольный треугольник с моделирующим перемещение h катетом ED , где: δ – измеренный акселерометром угол в КТ; 1 – положение крепежного элемента в момент измерения угла δ ; 2 – положение пластины стенда в момент измерения угла δ

Fig. 3. Right triangle with a leg ED simulating the displacement h , where: is the angle measured by the accelerometer at the control point; 1 is the position of the fastening element at the moment of measuring the angle δ ; 2 is the position of the stand plate at the moment of measuring the angle δ

следующие обозначения: l_{cp} – расстояние от края пластины до контрольной точки; h – расстояние, на которое перемещается пластина в контрольной точке при изгибе; H – расстояние от поверхности, на которой установлен стенд, до верхней части пластины при изгибе; 1 – крепежный элемент в исходном положении (до нагружения края пластины); 2 – пластина в исходном положении (до нагружения); 3 – пластина после нагружения; 4 – крепежный элемент после нагружения.

В результате проведенных экспериментальных измерений были сформированы две таблицы с набором измеренных значений вертикальных перемещений поверхности пластины и углов наклона акселерометров для КТ 1, 4, 6, 8, 10 и 12.

Выявлено, что простые аналитические зависимости не обеспечивают требуемой точности при аппроксимации значений прогибов пластины в КТ через угловые величины, регистрируемые акселерометром. Данное обстоятельство потребовало разработки специализированного математического обеспечения, способного адекватно описывать прогибы исследуемого объекта.

При этом с использованием данных из серии опытов, в том числе известных значений перемещения поверхности пластины в КТ, при данном угле наклона были предложены три способа, позволяющих на основе значения измеряемого угла в КТ рассчитать прогиб пластины для конкретной КТ (h , Рис. 2).

В основу способов положены свойства прямоугольного треугольника. При перемещении поверхности пластины в КТ за счет нагружения ее краев выделяется прямоугольный треугольник EFD , где катет ED моделирует проекцию перемещения поверхности пластины в КТ на ось OY . Прямоугольный треугольник с моделирующим перемещение h катетом ED показан на Рис. 3.

Гипотенуза EF является расчетной для каждой КТ на пластине стенда и по своему значению не равна l_{cp} (Рис. 2). Для расчета EF используются средние значения катета ED – ED_{CPe} и $\angle \delta_e$. Катет ED_{CPe} в данном способе можно охарактеризовать как среднее вертикальное перемещение пластины в заданной КТ при прогибе нагруженных краев пластины на 1 мм в диапазоне от 0 мм до 15 мм. Тогда ED_{CPe} рассчитывается по формуле (1):

$$ED_{CPe} = \frac{H_{cp} - H_{cpn}}{n}, \quad (1)$$

где H_{cp} – измеренная штангенциркулем высота от поверхности, на которой смонтирован стенд, до верхней части пластины в данной КТ без нагрузки на край пластины; H_{cpn} – измеренная штангенциркулем высота от поверхности, на которой смонтирован стенд, до верхней части пластины в КТ, соответствующая степени перемещения края пластины при нагружении в диапазоне от 0 до 15 мм с шагом в 1 мм.

Для расчета гипотенузы EF $\angle \delta_e$ рассматривается как средний измеренный акселерометром в данной КТ угол при перемещении вниз края пластины на 1 мм в диапазоне от 0 мм до 15 мм. Угол δ_e выражается следующей формулой (2):

$$\delta_{CPe} = \frac{\delta_{CP} - \delta_{CPn}}{n}, \quad (2)$$

где δ_{CP} – измеренный акселерометром угол наклона пластины в КТ без нагрузки на край пластины; δ_{CPn} – измеренные акселерометром углы наклона пластины в КТ, соответствующие значениям перемещений края пластины при ее прогибе в диапазоне от 0 до 15 мм с шагом в

1 мм, n – количество контрольных точек. Тогда средняя гипотенуза EF рассчитывается исходя из свойств прямоугольного треугольника по формуле (3):

$$EF = \frac{ED_{CPe}}{\sin(\delta_{CPe})}. \quad (3)$$

Далее рассчитанная для каждой КТ гипотенуза EF используется в качестве исходной для расчета перемещения h – сторона ED прямоугольного треугольника EFD (Рис. 3) на основе измеренного акселерометром $\angle \delta$ в той же контрольной точке описывается формулой (4):

$$ED_{CP} = EF \cdot \sin(\delta_{CP}), \quad (4)$$

где ED_{CP} – расчетное перемещение поверхности пластины в КТ; EF – рассчитанная для данной КТ гипотенуза треугольника EFD ; δ_{CP} – измеренный акселерометром угол наклона пластины в КТ.

Данный способ позволяет рассчитать вертикальное перемещение КТ на пластине в пространстве без привязки к другим объектам. Таким образом, можно судить о прогибе поверхности конструкции или незначительном

наклоне в контрольной точке, где установлен акселерометр, но нельзя определять положение конструкции относительно других объектов.

С использованием измеренных значений перемещений пластины в КТ1, КТ4, КТ6, КТ8, КТ10 и КТ12, а также расчетных перемещений данных контрольных точек выявлены три способа расчета положения контрольной точки относительно поверхности, на которой смонтирован стенд.

Способ № 1. Перемещение ED_{CPd} рассчитывается по измеренным акселерометром углам в КТ. Исходной точкой отсчета, связывающей расчетные перемещения с объектом в пространстве (поверхность, на которой смонтирован стенд), является измеренное расстояние от поверхности, на которой расположен стенд, до верхней поверхности пластины в соответствующей КТ – H_{cp} , тогда формула (5) принимает вид:

$$H_{CPn} = H_{cp} \pm ED_{CPd}, \quad (5)$$

где: H_{CPn} – расстояние от поверхности, на которой смонтирован стенд, до пластины в КТ

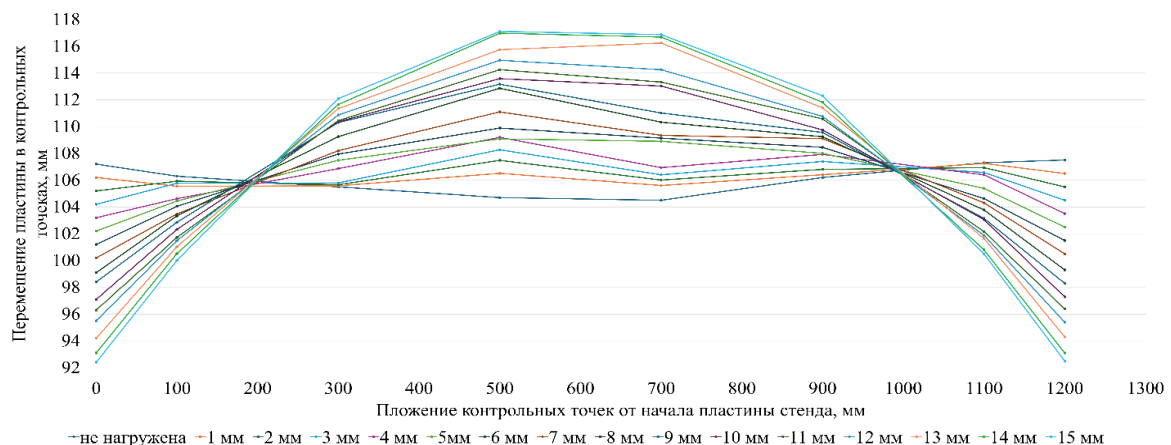


Рис. 4. График перемещений пластины по изменению положения КТ, полученный по способу № 1
Fig. 4. Graph of plate displacements based on changes in the position of control points, obtained using method № 1

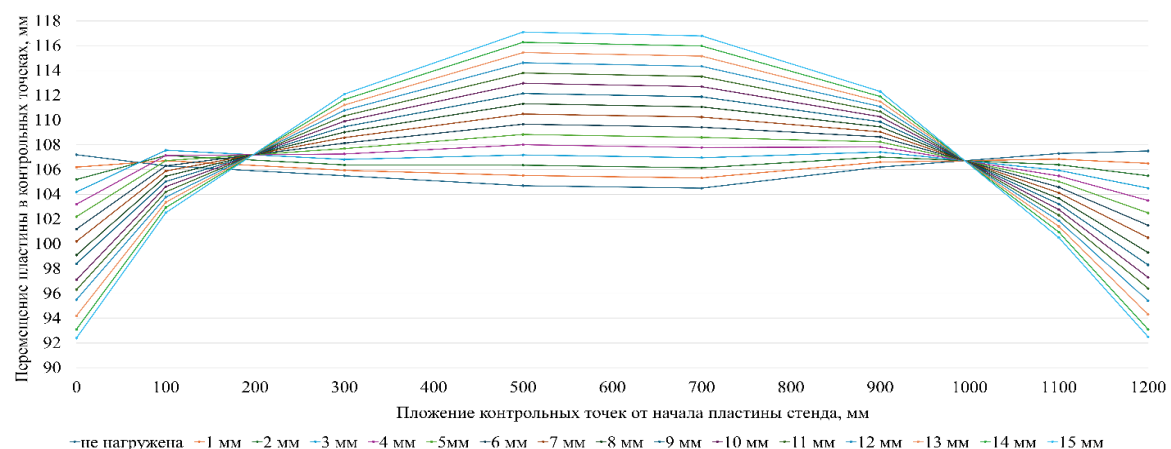


Рис. 5. График перемещений пластины по изменению положения КТ, полученный по способу № 2
Fig. 5. Graph of plate displacements based on changes in the position of control points, obtained using method № 2

при деформации края пластины на n мм; ED_{CPd} – перемещение пластины в КТ, рассчитанное исходя из измеренного акселерометром угла наклона пластины в КТ.

Исходя из результатов измерения углов акселерометром в ходе проведенного эксперимента по предложенному методу были рассчитаны значения перемещений поверхности пластины для КТ при каждой стадии нагружения (прогиб краев пластины в диапазоне от 0 мм до 15 мм с шагом 1 мм). В результате получен график, моделирующий вертикальное перемещение пластины по изменениям положения КТ, полученный по способу 1, крайевые точки 0 и 1200 мм взяты из по результатам ручных измерений штангенциркулем (Рисунок 4).

Из графика на Рис. 4 видно, что крепления пластины к поперечным траверсам (Рис. 1, поз. 5) на уровне 200 мм и 1000 мм по оси абсцисс установлены с достаточной точностью.

Способ № 2. Перемещение пластины в КТ считается фиксированным и равным – ED_{Cpe} , полученным ранее в ходе обработки результатов эксперимента. Угол наклона, измеренный акселерометром, также считается фиксированным и равен $\delta_{Cpe} \pm (\delta_{Cpe} \div 2)$ с округлением измеренного акселерометром угла в КТ. Точкой отсчета, связывающей расчетные перемещения с объектом в пространстве (поверхность, на которой смонтирован стэнд), выбрано измеренное расстояние от поверхности, на которой расположен стэнд, до верхней поверхности пластины в соответствующей КТ – H_{CPn} , рассчитывается по формуле (6)

$$H_{CPn} = H_{CP} \pm ED_{Cpe} \cdot n, \quad (6)$$

где: H_{CPn} – расстояние от поверхности, на которой смонтирован стэнд, до пластины в КТ

при перемещении края пластины на n мм; n – расстояние, на которое вертикально сместился нагруженный край пластины при нагружении, мм.

По расчетным данным построен график, моделирующий вертикальное перемещение пластины по изменениям положения КТ, полученный по способу № 2, показанный на Рис. 5.

На Рис. 5 видно, что применение способа № 2 для расчета положения пластины в КТ дает значительно большие погрешности в сравнении со способом № 1 и не позволяет точно определить положение одной из траверс стэнда (смещение пересечения графиков за 200 мм по оси абсцисс).

Способ № 3. Расчет положения контрольных точек при известном расстоянии перемещения краев пластины в процессе нагружения и измеренных акселерометром углов наклона пластины в КТ. При расчете перемещения пластины в КТ по данному способу точками отсчета для расчета положения КТ относительно поверхности, на которой расположен стэнд, считаются расстояния от данной поверхности до пластины при каждой итерации нагружения, измеренные ручным методом. Расчет положения КТ при каждой итерации нагружения выполняется по формулам (7)–(12):

$$H_{CP1n} = H_{0n} \pm ED_{CP1d,n}, \quad (7)$$

$$H_{CP4n} = H_{1n} \pm ED_{CP4d,n}, \quad (8)$$

$$H_{CP6n} = H_{4n} \pm ED_{CP6d,n}, \quad (9)$$

$$H_{CP8n} = H_{10n} \pm ED_{CP8d,n}, \quad (10)$$

$$H_{CP10n} = H_{12n} \pm ED_{CP10d,n}, \quad (11)$$

$$H_{CP12n} = H_{1200n} \pm ED_{CP12d,n}, \quad (12)$$

где: H_{CP1n} , H_{CP4n} , H_{CP6n} , H_{CP8n} , H_{CP10n} , H_{CP12n} – расстояние от поверхности, на которой

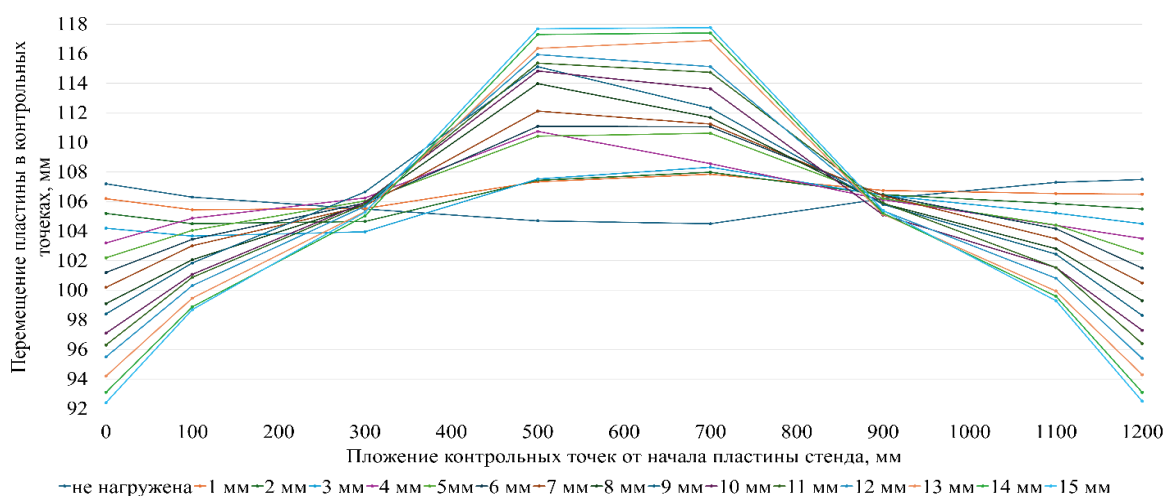


Рис. 6. График перемещений пластины по изменениям положения КТ, полученный по способу № 3
Fig. 6. Graph of plate displacements based on changes in the position of control points, obtained using method № 3

расположен стэнд, до пластины в $КТ_1 - КТ_{12}$ при отклонении края пластины на n мм; H_{0n} и H_{1200n} – расстояние от поверхности, на которой расположен стэнд, до правого и левого края пластины, перемещенного на n мм, при нагружении; $ED_{CP1d,n}$, $ED_{CP4d,n}$, $ED_{CP6d,n}$, $ED_{CP8d,n}$, $ED_{CP10d,n}$, $ED_{CP12d,n}$ – перемещение в соответствующей КТ, рассчитанное на основе измеренного акселерометром угла наклона пластины n мм.

Согласно формулам (7)–(12) по способу № 3 были рассчитаны положения КТ для каждой итерации перемещения краев пластины стэнда в ходе нагружения. По результатам расчета был построен график, моделирующий вертикальное перемещение пластины по изменениям положения КТ, полученных по способу № 3, показанный на Рис. 6.

При сравнении графиков на Рис. 6 с Рис. 4 и 5 видно, что график, построенный по способу № 3, менее точен, чем графики на Рис. 4 и 5. Точки установки траверс стэнда на Рис. 6 (пересечения основной части графиков в одной точке) не совпадают с фактическими значениями (Рис. 1), при этом сохранены вертикальные перемещения пластины между траверсами.

Таким образом, способ № 1 дает минимальное отличие от измеренных значений H_{CPn} менее 3 мм, а в основном менее 2 мм. При перемещении краев пластины в ходе нагружения на 5 мм и более измеряемый акселерометром угол наклона в КТ становится более 1° . Из уменьшившейся погрешности можно сделать вывод, что после наклона 1° возрастает точность измерения угла наклона акселерометром.

Более точно данное явление отображено в диаграммах зависимости разности расчетного перемещения пластины и измеренного значения перемещения в КТ от измеренного

акселерометром угла наклона, показанных на Рис. 7.

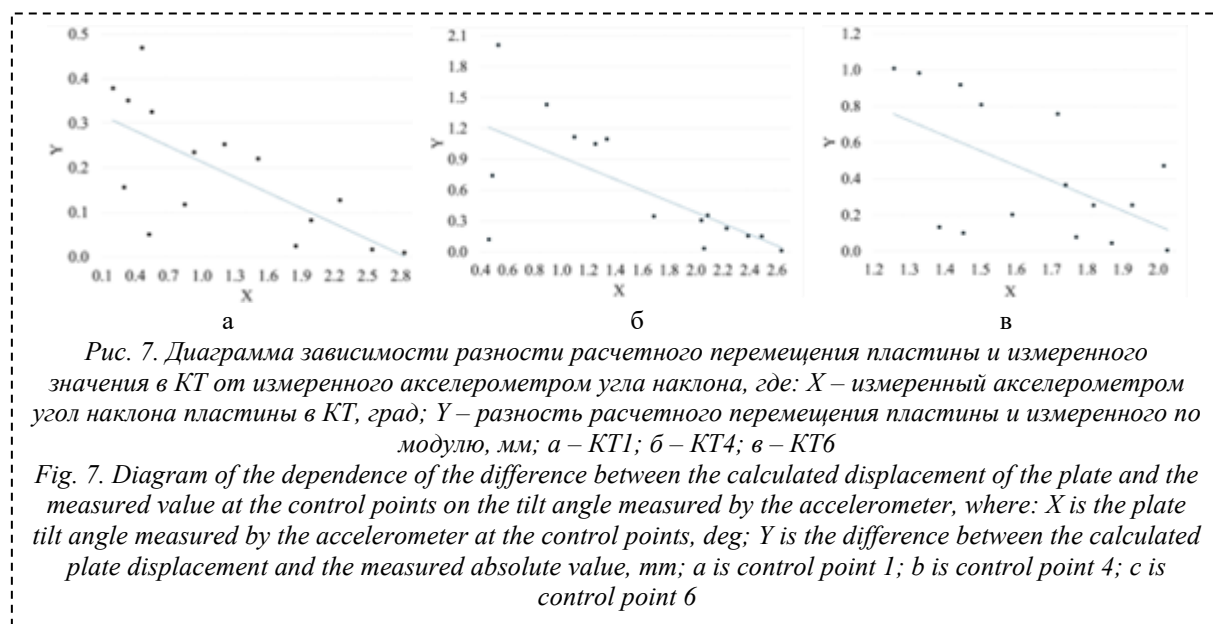
На Рис. 7 видно, что значение разности между расчетным и измеренным значениями перемещения пластины в КТ, взятыми по модулю, значительно уменьшается и становится стабильно менее 1 мм после достижения значения угла наклона пластины в КТ $1,6^\circ$. При этом во всем диапазоне измеренных углов в основном разность между расчетным и измеренным значением перемещения пластины в КТ составляет менее 1,5 мм.

Проведенная серия экспериментов показала, что с помощью акселерометра возможно измерение малых углов (менее 2°) и использование измеренного угла для расчета перемещения конструкции в случае уклона в продольной и поперечной плоскости, а также фиксирование перемещения отдельных частей конструкции, вызванных их нагружением.

Соответственно, с помощью измерения углов наклона МЭМС-акселерометрами возможно контролировать положение секций относительно продольных и поперечных осей, обеспечивая предотвращение нежелательных деформаций конструкций в режиме распора и разгрузки в диапазоне $\pm 1,5$ мм, что соответствует проектному перемещению штока опорного гидроцилиндра в режиме распора в течение 0,1 с, и 0,05 с в режиме разгрузки [9].

Выявлено, что влияние точности измерения угла акселерометром на значение разности между расчетным и измеренным значением перемещения пластины в КТ уменьшается с уменьшением площади контакта крепежного элемента с пластиной.

Результаты оценки потенциала МЭМС-акселерометров указывают на перспективность их внедрения в контур управления МШК. Использование инклинометрии на основе



МЭМС-акселерометров обеспечивает необходимую информативность при измерении малых углов наклона, позволяя с высокой достоверностью идентифицировать наклон секции МШК относительно продольной и поперечной осей и возникновение нежелательных деформаций секций МШК в режимах переменного нагружения.

Заключение

Обоснован способ мониторинга прогиба деформируемой поверхности в контрольной точке, заключающийся в непрерывном отслеживании изменений угла ее наклона.

Экспериментально подтверждено, что современные МЭМС-акселерометры способны регистрировать сверхмалые изменения положения (менее $0,7^\circ$), которые возникают при работе гидравлических узлов шагающей крепи, с достаточной точностью.

Использование аналитического расчета, основанного на свойствах прямоугольного треугольника конвертировать данные об углах наклона в линейные показатели вертикального перемещения поверхности, применимо при наличии предварительно полученных экспериментальных данных в диапазоне регистрируемых значений.

Показано, что интерпретация значений прогибов конструкции в виде локального изменения углов наклона в контрольных точках требует разработки специализированного математического аппарата для пересчета измеренного угла наклона поверхности в значение размера проекции перемещения на одну из осей в заданной координатной системе.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2024-0025 «Разработка научных основ создания автономных и автоматизированных горных машин, оборудования, технических и управляющих систем на базе перспективных цифровых и роботизированных технологий» (продление).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rakesh M., Dash A. K. Strata Control Challenges and Monitoring Strategies in Indian Coal Mining under Complex Geotechnical Conditions // Journal of Mines, Metals and Fuels. 2025. Vol. 73. Iss. 7. Pp. 2197–2206. DOI: 10.18311/jmmf/2025/49359.
2. Zhou Y., Li C., Yang W. Dynamic Assessment of the Eco-Environmental Effects of Open-Pit Mining: A Case Study in a Coal Mining Area (Inner Mongolia, Western China) // Sustainability. 2025. Vol. 17. Iss. 11. Art. 5078. DOI: 10.3390/su17115078.

3. Santoso H., Situmorang R. M. Groundwater Modeling in Open Pit Coal Mining Plans using the Finite Difference Method – Case Study from the Bengalon River Basin (East Kalimantan, Indonesia) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2025. Vol. 1517. Art. 012025. DOI: 10.1088/1755-1315/1517/1/012025.

4. Long M., Schafrik S., Kolapo P., Agioutantis Z., Sottile J. Equipment and Operations Automation in Mining: A Review // Machines. 2024. Vol. 12. Iss. 10. Art. 713. DOI: 10.3390/machines12100713.

5. Wang G., Ren H., Zhao G., Zhang D., Wen Z., Meng L., Gong S. Research and practice of intelligent coal mine technology systems in China // International Journal of Coal Science & Technology. 2022. Vol. 9. Art. 24. DOI: 10.1007/s40789-022-00491-3.

6. Айнбиндер И. И., Пацкевич П. Г. Концепция построения горнотехнических систем при переходе к роботизированным подземным геотехнологиям // Горная промышленность. 2025. № S5. С. 14–19. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-S5-14-19. EDN XBRZYJ.

7. Клишин В. И., Фрянов В. Н., Павлова Л. Д., Никитенко С. М., Малахов Ю. В. Исследование взаимодействия многофункциональной шагающей крепи с массивом горных пород при проведении подземных выработок // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2021. № 3. С. 3–12. DOI: 10.15372/FTPRPI20210301. EDN WRTYDZ.

8. Клишин В. И., Малахов Ю. В., Никитенко С. М., Стародубов А. Н., Никитенко М. С. Механизированная шагающая крепь как платформа для создания высокоэффективных проходческих и очистных комплексов // Развитие производительных сил Кузбасса: история, современный опыт, стратегия будущего : международная научно-практическая конференция, Москва: Российская академия наук, 2024. С. 192–210. EDN UIACQF.

9. Малахов Ю. В. Обоснование параметров многофункциональной механизированной шагающей крепи : дисс. ... канд. техн. наук. 2022. 170 с. EDN JKDOLY.

10. Liang M., Li K., Fang X., Zheng D., Lu X., Wu G., Lu H. Development of FBG Inclination Sensor: A Study on Attitude Monitoring of Hydraulic Supports in Coal Mines // Applied Sciences. 2025. Vol. 15. Iss. 7. Art. 3429. DOI: 10.3390/app15073429.

11. Wang S., Wang S. Longwall mining automation horizon control: Coal seam gradient identification using piecewise linear fitting // International Journal of Mining Science and Technology. 2022. Vol. 32. Issue 4. Pp. 821–829. DOI: 10.1016/j.ijmst.2022.02.003.

12. Nikitenko M. S. Evaluation of elements loading in the metal structures of powered support units

// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2016. P. 012007. DOI: 10.1088/1755-1315/45/1/012007. EDN XFUGVJ.

13. Ерасов В. С., Орешко Е. И. Деформация и разрушение как процессы изменения объема, площади поверхности и линейных размеров в нагружаемых телах // Труды ВИАМ. 2016. № 8(44). С. 11. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-11-11. EDN WKEVTD.

14. Shokrani A., Dogan H., Burian D., Nwabueze T. D., Kolar P., Liao Z., Sadek A., Teti R., Wang P., Pavel R., Schmitz T. Sensors for in-process and on-machine monitoring of machining operations // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2024. Vol. 51. Pp. 263–292. DOI: 10.1016/j.cirpj.2024.05.001.

15. Tongxu X., Xu X., Zhang J., Ye H. Thermal calibration for triaxial gyroscope of MEMS-IMU based on segmented systematic method // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. Art. 17. DOI: 10.1038/s41598-024-74472-8.

16. Кострин Д. К. Современные электронные датчики угла наклона: обзор основных физических принципов функционирования и перспективных разработок // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2024. Т. 17. № 6. С. 5–23. DOI: 10.32603/2071-8985-2024-17-6-5-23. EDN ABAZVV.

17. Jin Y., Ma Z., Ye Z., Li M., Zheng X., Jin Z. A self-centering and stiffness-controlled MEMS accelerometer // Microsystems & Nanoengineering. 2024. Vol. 10. P. 14. DOI: 10.1038/s41378-023-00647-4.

18. Farago D., Maczak B., Gingl Z. Enhancing Accuracy in Actigraphic Measurements: A

Lightweight Calibration Method for Triaxial Accelerometers // IEEE Access. 2024. Vol. 12. Pp. 38102–38111. DOI 10.1109/ACCESS.2024.3374652.

19. Малыгин А. Д. Применение МЭМС-акселерометров в задачах мониторинга // Энергетика и энергосбережение: теория и практика : Сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции. Кемерово : Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2020. С. 407–1–407-5. EDN HLOUQM.

20. Szurgacz D., Konrad T., Pokorny J., Janik D. Analysis of the Algorithm Monitoring the Geometric Parameters of the Powered Support Based on Station Tests // Energy Science & Engineering. 2025. Pp. 1–12. DOI: 10.1002/ese3.70396.

21. Liu Q., Kong F., Chen X., Wang G., Li K. Improving the accuracy of dynamic inclination measurement by machine learning // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. Art. 25071. DOI: 10.1038/s41598-024-76032-6.

22. Программа сбора данных для исследования положения поддерживающей части шагающей крепи в режиме реального времени: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025696847 Российская Федерация / Е. А. Баловнев, С. А. Кизилов, М. С. Никитенко, А. Д. Вдовенко ; заявл. 09.12.2025 : опубл. 21.12.2025, заявитель ФГБНУ «ФИЦ УУХ СО РАН», Бюл. № 1. 1 с. EDN QECLQJ.

23. Luczak S., Oleksiuk W., Bodnicki M. Sensing Tilt With MEMS Accelerometers // IEEE Sensors Journal. 2006. Vol. 6. Issue 6. Pp. 1669–1675. DOI: 10.1109/JSEN.2006.881433.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Кизилов Сергей Александрович, кандидат технических наук, научный сотрудник, ФИЦ УУХ СО РАН (650000, Россия, г. Кемерово, пр-т Ленинградский, 10), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2554-1383>, e-mail: sergkizilov@gmail.com

Баловнев Евгений Александрович, младший научный сотрудник, ФИЦ УУХ СО РАН (650000, Россия, г. Кемерово, пр-т Ленинградский, 10), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6826-7098>, e-mail: balovnev.evgeny.a@gmail.com

Никитенко Михаил Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, ФИЦ УУХ СО РАН (650000, Россия, г. Кемерово, пр-т Ленинградский, 10), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8752-1332>, e-mail: ltd.mseng@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Кизилов Сергей Александрович – обзор актуальной литературы, разработка методики проведения эксперимента, проектирование стенда, написание текста.

Баловнев Евгений Александрович – сборка стенда, проведение измерений, выполнение экспериментов, написание текста.

Никитенко Михаил Сергеевич – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, анализ данных, итоговое редактирование текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

MEMS ACCELEROMETER-BASED TRACKING OF STRUCTURAL DISPLACEMENT IN MINING EQUIPMENT

Sergey A. Kizilov*, Evgeny A. Balovnev,
Mikhail S. Nikitenko

Federal Research Centre of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of Russian Academy of Science

* for correspondence: sergkizilov@gmail.com



Article info

Received:
30 March 2026Accepted for publication:
15 June 2026Accepted:
01 July 2026**Keywords:** powered roof support, accelerometer, automatic control system, inclination angle, spatial position**Abstract.**

The modern mineral resource industry faces various challenges driven by deteriorating mining and geological conditions and increasing extraction depths, which can lead to reduced productivity. Under such conditions, the implementation of automatic control systems for mining machinery and equipment becomes critically important to ensure the safety and efficiency of mining operations. Tracking the actual spatial position, as well as the actual loads on the structural elements of equipment, also remains a largely unresolved task. In this regard, this work is dedicated to the application of an array of microelectromechanical accelerometers (MEMS accelerometers) for the simultaneous monitoring of the actual spatial position and deflection of the beams in powered roof support sections. A relevant problem formulation is considered, involving the measurement of equipment element inclination angles with an error of less than 1° , occurring during the operation of the support hydraulic cylinders in real-time. The results of a series of experiments comparing the calculated data-measurements obtained with MEMS accelerometers-against reference values obtained through direct measurement methods are presented. Three methods for recalculating angular values into the projection of the vertical displacement of reference points onto the ordinate axis are proposed and compared. It is experimentally demonstrated that the application of the MEMS inclinometry method provides sufficient accuracy for recording beam deflections (error less than 1.5 mm) at inclination angles from 0.14° . The conclusion is drawn regarding the promising integration of MEMS inclinometers into the control system of the powered roof support for the early detection of undesirable deformations and spatial position monitoring.

For citation: Kizilov S.A., Balovnev E.A., Nikitenko M.S. MEMS accelerometer-based tracking of structural displacement in mining equipment *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 3(175):36-46. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-3-36-46, EDN: JJRCFB

REFERENCES

1. Rakesh M., Dash A.K. Strata Control Challenges and Monitoring Strategies in Indian Coal Mining under Complex Geotechnical Conditions. *Journal of Mines, Metals and Fuels*. 2025; 73(7):2197-2206. (In Eng.) DOI: 10.18311/jmmf/2025/49359.
2. Zhou Y., Li C., Yang W. Dynamic Assessment of the Eco-Environmental Effects of Open-Pit Mining: A Case Study in a Coal Mining Area (Inner Mongolia, Western China). *Sustainability*. 2025; 17(11):5078. (In Eng.) DOI: 10.3390/su17115078.
3. Santoso H., Situmorang R.M. Groundwater Modeling in Open Pit Coal Mining Plans using the Finite Difference Method – Case Study from the Bengalon River Basin (East Kalimantan, Indonesia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2025; 1517:012025. (In Eng.) DOI: 10.1088/1755-1315/1517/1/012025.
4. Long M., Schafrik S., Kolapo P., Agioutantis Z., Sottile J. Equipment and Operations Automation in Mining: A Review. *Machines*. 2024; 12(10):713. (In Eng.) DOI: 10.3390/machines12100713.
5. Wang G., Ren H., Zhao G., Zhang D., Wen Z., Meng L., Gong S. Research and practice of intelligent coal mine technology systems in China. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2022; 9:24. (In Eng.) DOI: 10.1007/s40789-022-00491-3.
6. Aynbinder I.I., Patskevich P.G. A concept of designing mining systems in transition to robotic underground geotechnologies. *Russian Mining Industry*. 2025; S5:14-19. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2025-5S-14-19. EDN XBRZYJ.
7. Klishin V.I., Nikitenko S.M., Malakhov Y.V., Fryanov V.N., Pavlova L.D. Rock mass-multifunction mobile roof support interaction in mining. *Journal of Mining Science*.

- 2021; 57(3):361-369. (In Russ.) DOI: 10.1134/S1062739121030017. EDN HAROZW.
8. Klishin V.I., Malakhov Yu.V., Nikitenko S.M., Starodubov A.N., Nikitenko M.S. Mechanized Walking Support as a Platform for Creating High-Efficiency Drilling and Mining Complexes. *Development of the Kuzbass's Productive Forces: History, Modern Experience, and Future Strategy: International Scientific and Practical Conference, Moscow: Russian Academy of Sciences; 2024. Pp. 192-210. (In Russ.) EDN UIACQF.*
9. Malakhov Yu.V. Justification of parameters of a multifunctional mechanized walking support : Diss. ... Cand. Tech. Sci. 2022. 170 p. (In Russ.) EDN JKDOLY.
10. Liang M., Li K., Fang X., Zheng D., Lu X., Wu G., Lu H. Development of FBG Inclination Sensor: A Study on Attitude Monitoring of Hydraulic Supports in Coal Mines. *Applied Sciences*. 2025; 15(7):3429. (In Eng.) DOI: 10.3390/app15073429.
11. Wang S., Wang S. Longwall mining automation horizon control: Coal seam gradient identification using piecewise linear fitting. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2022; 32(4):821-829. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.ijmst.2022.02.003.
12. Nikitenko M.S. Evaluation of elements loading in the metal structures of powered support units. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2016; 012007. (In Eng.) DOI: 10.1088/1755-1315/45/1/012007. EDN XFUGVJ.
13. Erasov V.S., Oreshko E.I. Deformation and destruction as processes of change of volume, the areas of a surface and the linear sizes in loaded bodies. *The works of VIAM*. 2016; 8(44):11. (In Russ.) DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-11-11. EDN WKEVTD.
14. Shokrani A., Dogan H., Burian D., Nwabueze T.D., Kolar P., Liao Z., Sadek A., Teti R., Wang P., Pavel R., Schmitz T. Sensors for in-process and on-machine monitoring of machining operations. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2024; 51:263-292. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.cirpj.2024.05.001.
15. Tongxu X., Xu X., Zhang J., Ye H. Thermal calibration for triaxial gyroscope of MEMS-IMU based on segmented systematic method. *Scientific Reports*. 2024; 14:17. (In Eng.) DOI: 10.1038/s41598-024-74472-8.
16. 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; 17(6):5-23. (In Russ.) DOI: 10.32603/2071-8985-2024-17-6-5-23. EDN ABAZVV.
17. Jin Y., Ma Z., Ye Z., Li M., Zheng X., Jin Z. A self-centering and stiffness-controlled MEMS accelerometer. *Microsystems & Nanoengineering*. 2024; 10:14. (In Eng.) DOI: 10.1038/s41378-023-00647-4.
18. Farago D., Maczak B., Gingl Z. Enhancing Accuracy in Actigraphic Measurements: A Lightweight Calibration Method for Triaxial Accelerometers. *IEEE Access*. 2024; 12:38102-38111. (In Eng.) DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3374652.
19. Malygin A.D. Application of MEMS Accelerometers in Monitoring Tasks. *Energy and Energy Saving: Theory and Practice: Collection of Materials of the V All-Russian Scientific and Practical Conference. Kemerovo: Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev; 2020; 407-1-407-5. (In Russ.) EDN HLOUQM.*
20. Szurgacz D., Konrad T., Pokorny J., Janik D. Analysis of the Algorithm Monitoring the Geometric Parameters of the Powered Support Based on Station Tests. *Energy Science & Engineering*. 2025. Pp. 1-12. (In Eng.) DOI: 10.1002/ese3.70396.
21. Liu Q., Kong F., Chen X., Wang G., Li K. Improving the accuracy of dynamic inclination measurement by machine learning. *Scientific Reports*. 2024; 14:25071. (In Eng.) DOI: 10.1038/s41598-024-76032-6.
22. Data collection program for studying the position of the supporting part of the walking support in real time: Certificate of state registration of the computer program No. 2025696847 Russian Federation / E.A. Balovnev, S.A. Kizilov, M.S. Nikitenko, A.D. Vdovenko ; application 09.12.2025 : publ. 21.12.2025, applicant "FRC CCC SB RAS", Bul. № 1. 1 p. (In Russ.) EDN: QECLQJ.
23. Luczak S., Oleksiuk W., Bodnicki M. Sensing Tilt With MEMS Accelerometers. *IEEE Sensors Journal*. 2006; 6(6):1669-1675. (In Eng.) DOI: 10.1109/JSEN.2006.881433.

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Sergey A. Kizilov, Cand. Sci. (Eng.), Scientific fellow, FRC CCC SB RAS (650000, Russia, Kemerovo, Leningradsky av., 10), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2554-1383>, e-mail: sergkizilov@gmail.com

Evgeny A. Balovnev, Junior scientific fellow, FRC CCC SB RAS (650000, Russia, Kemerovo, Leningradsky av., 10), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6826-7098>, e-mail: balovnev.evgeny.a@gmail.com

Mikhail S. Nikitenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, FRC CCC SB RAS (650000, Russia, Kemerovo, Leningradsky av., 10), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8752-1332>, e-mail: ltid.mseng@gmail.com

Contribution of the authors:

Sergey A. Kizilov – review of relevant literature, development of an experimental methodology, design of a stand, and writing a text.

Evgeny A. Balovnev – assembling the stand, taking measurements, performing experiments, and writing text.

Mikhail S. Nikitenko – setting the research task, conceptualizing the research, analyzing the data, and final editing of the text.

All authors have read and approved the final manuscript.

