

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

Научная статья

УДК 622.502:681.2.08

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-185-192

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ДАТЧИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СМЕЩЕНИЙ В КРОВЛЕ

Пудов Евгений Юрьевич

Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева,
филиал в г. Прокопьевске

* для корреспонденции: pudov_evgen@mail.ru

Аннотация.

Качественное и быстрое проведение горных выработок предъявляет к проходческой и очистной технике высокие требования по надежности, производительности и ряду других критериев. В свою очередь угольный и породный массивы требуют проведения своевременных обследований и контроля его состояния. Непрерывность и высокая точность контроля за состоянием угольно-породного массива позволят спрогнозировать

и избежать опасные последствия, вызванные неожиданными обрушениями кровли.

Эти факторы и все возрастающие объемы очистных работ требуют оптимальных методов диагностики

и контроля состояния кровли, которые обладают такими важными свойствами, как высокая достоверность результатов, удобство и оперативность проведения работ, а также минимизация трудовых и экономических затрат для их проведения, безопасность реализации.

Одним из вариантов решения подобной задачи является разработка и внедрение датчиков определения смещений в кровле. Команда разработчиков, работающая над проектом, рассматривает несколько различных вариантов допустимого исполнения потенциального датчика определения смещений в кровле. В качестве потенциальных для опытного исследования были приняты в работу несколько вариантов, базирующихся на разных физических эффектах определения смещений, передачи и накопления получаемых данных. В данной статье будут рассмотрены первые экспериментальные и теоретические наработки по тематике. Далее планируется серия статейных материалов, повествующих о развитии данного направления в части практической реализации и испытаний опытных образцов как самих датчиков, так и в сочетании с системой обработки, передачи, интерпретации и визуализации данных. Особой задачей в последующем будет рассмотрение специфики интеграции получаемых данных с системой безопасности и оповещения угольных предприятий в контексте действующих требований к промышленной безопасности и МФСБ. Примечательно, что несмотря на наличие на рынке предложений по определенным исполнениям датчиков, они не вызвали значительного интереса к внедрению в силу ряда существенных технико-экономических недостатков, которые следует обойти при реализации новой системы



Информация о статье

Поступила:

08 августа 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

10 октября 2025 г.

Принята к публикации:

13 октября 2025 г.

Опубликована:

23 октября 2025 г.

Ключевые слова:

датчик перемещения, кровля,
состояние массива,
безопасность, определение
смещений

Для цитирования: Пудов Е.Ю. Выбор рациональных решений при разработке датчика определения смещений в кровле // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 5 (171). С. 185-192. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-185-192, EDN: FEYQDB

1. Введение. Обеспечить необходимые темпы проходки горных выработок для подготовки нового выемочного столба возможно при условии применения высокопроизводительной технологии комбайновой проходки и эффективной технологии анкерного крепления подготовленных выработок.

Наиболее слабым звеном в решении вопросов по повышению эффективности анкерного крепления является недостаточная изученность геомеханических процессов в горном массиве выработок. Нагрузка на анкерную крепь будет определяться

не только горно-геологическими и горнотехническими факторами, но и временем, прошедшим с момента обнажения пород. По этой причине дальнейшее исследование должно быть направлено на определение нагрузок на анкерную крепь с учетом напряженно-деформированного состояния в краевой части горных выработок и временного фактора.

Согласно Руководству по проектированию подземных горных выработок и расчету крепи [1],

в составе проектов особо ответственных выработок, нарушение которых ведет к остановке всего предприятия, для контроля их состояния следует предусматривать установку контрольных приборов и замерных станций.

Основное целевое назначение контрольных наблюдений и измерений в выработке в большинстве случаев заключается в определении фактических характеристик горных пород и крепи и установлении соответствия принятых при проектировании параметров охраны, защиты и крепи, требуемых в конкретных условиях. По состоянию устойчивости пород и деформированию крепи выработки производится оценка фактического влияния различных факторов и воздействий, и своевременно могут быть приняты профилактические меры по недопущению нарушения эксплуатационного состояния выработки. При проектировании выработок в сложных горно-геологических условиях наряду с проведением контрольных наблюдений

и измерений рекомендуется также предусматривать в проектах установку специальных замерных станций. Последние позволяют получить более полные и надежные исходные данные, дадут возможность проверить и уточнить принятые при проектировании способы охраны, защиты и крепи и выбрать оптимальные проектные решения, в том числе для других выработок, располагаемых в аналогичных условиях.

2. Методы. Разработка технологии проведения подготовительных горных

выработок с учетом определения напряженно-деформированного состояния массива и его влияния на параметры крепления и последующего поддержания является важной научно-технической задачей горного производства. Для оценки напряженно-деформированного состояния необходимо исследовать скорость развития и величину деформаций горных выработок, зону расслоений (трещинообразования); напряжения (сжатия, растяжения, касательные), смещения кровли от срока службы, а также от влияния очистных работ

(в динамике). Выявление закономерностей смещения кровли выработок позволит рассматривать влияние горно-геологических и горно-технических факторов на образование зон неупругих деформаций во вмещающих породах вокруг выемочных выработок. Кроме того, обнаруженные критические смещения кровли позволят своевременно принять меры по корректировке паспортов крепления, для усиления крепи горных выработок.

Несмотря на многолетние исследования, закономерности расслоения прочных пород кровли

и размеры зоны неупругих деформаций (ЗНД) в различных зонах опорного давления и влияние на них глубины заложения, параметров анкерной крепи и крепи усиления в кровле выработки, схем обрушения кровли в выработанном пространстве очистного забоя остаются недостаточно изученными, как теоретически, так и путем экспериментальных исследований.

Поэтому исследование условий расслоения пород кровли и высоты ЗНД и их взаимосвязи с основными горно-геологическими и горнотехническими факторами является весьма актуальной научно-технической задачей.

На основании вышеизложенного разработка экспериментального образца датчика определения смещений в кровле является задачей актуальной и своевременной.

Датчик перемещения – это прибор, предназначенный для определения величины линейного или углового механического перемещения какого-либо объекта. Разумеется, подобные приборы имеют колоссальное количество практических применений в самых разнообразных областях, поэтому существует множество классов датчиков перемещения, которые различаются по принципу действия, точности, цене и прочим параметрам. Следует сразу отметить, что все датчики перемещения можно разделить на две основных категории – датчики линейного перемещения и датчики углового перемещения (энкодеры). В рамках данного обзора существующих типов датчиков

основное внимание будет уделено именно датчикам линейного перемещения.

По физическому принципу преобразования линейных перемещений датчики перемещения могут быть:

- емкостными;
- оптическими;
- индуктивными;
- вихретоковыми;
- ультразвуковыми;
- магниторезистивными;
- потенциометрическими;
- магнитострикционными.

Анализ существующих типов датчиков линейных перемещений показывает следующие недостатки их применения в подземных горных выработках:

Недостатки потенциометрических датчиков:

- механический износ из-за истирания;
- погрешности в измерениях из-за следов истирания;
- проблемы при работе в жидкостях;
- переходное сопротивление, изменяющееся от скользящего контакта к измерительной дорожке;
- отсоединение скользящего контакта при сильном ускорении или вибрации;

- сложные испытания;
- ограниченные возможности выполнения в миниатюрной форме;
- помехи (шум).

Недостатки оптических датчиков:

- малое расстояние срабатывания;
- высокие требования к поверхности объекта обнаружения;
- низкая помехозащищенность от посторонних засветок;
- возможность запыления фотоэлемента;
- при измерении больших (свыше 100 мм) перемещений устройство будет иметь большие габаритные размеры;

- источник излучения должен быть достаточно мощным (лазер), т. е. будет значительная потребляемая мощность;
- наличие видимого лазерного луча;
- большой диапазон облучения (превышающий минимальное перемещение 1 мм);

- устройство практически не будет работоспособно в условиях воздействия механических факторов.

Недостатки индукционных датчиков:

- точность работы зависит от стабильности питающего напряжения по частоте;
- возможна работа только на переменном токе.

- сравнительно небольшой участок статической характеристики, где она имеет

линейную зависимость (рабочий участок характеристики);

- невысокий уровень выходного сигнала;
- наличие нулевого сигнала.

Указанные недостатки индукционных датчиков возможно минимизировать, но при этом существенно возрастает стоимость датчика.

Недостатки магнитных датчиков:

- довольно большая погрешность.
- влияние нестабильности механических напряжений в магнитопроводе вызывает нестабильность выходного сигнала датчика;
- электромагнитные свойства материалов изменяются во времени;

в магнитострикционных преобразователях, особенно работающих в тяжелых условиях эксплуатации, главным фактором, влияющим на динамику изменения полной погрешности в течение эксплуатации, является процесс старения материала волновода, выполненного из дисперсионно-твердеющих эливарных сплавов.

Недостатки тросиковых датчиков:

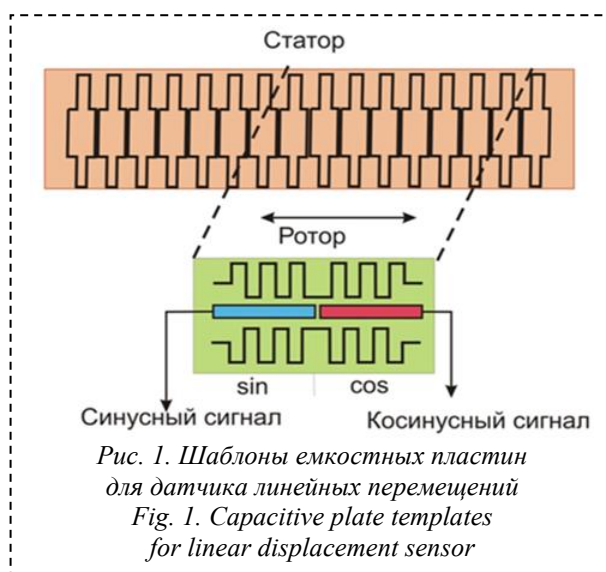
- чувствительность нелинейна;
- огромное внутреннее сопротивление;
- необходимость внедрения маленьких подводящих проводов;
- чувствительность к электронным помехам.

Недостатки ультразвуковых датчиков:

- относительно невысокая дальность действия;
- срабатывает только на достаточно резкие перемещения, плавное может не заметить;
- в основном используются как датчики приближения.

Недостатки емкостных датчиков:

- малая выходная мощность;
- необходимость экранировки от внешних полей.



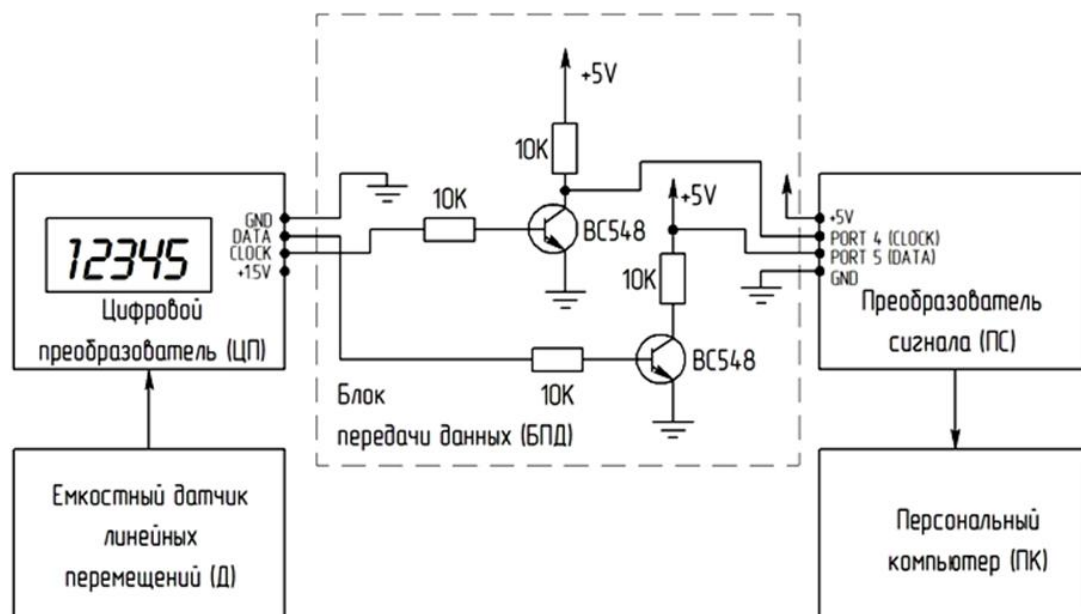


Рис. 2. Принципиальная схема разрабатываемого датчика учета смещений
 Fig. 2. Schematic diagram of the developed displacement sensor

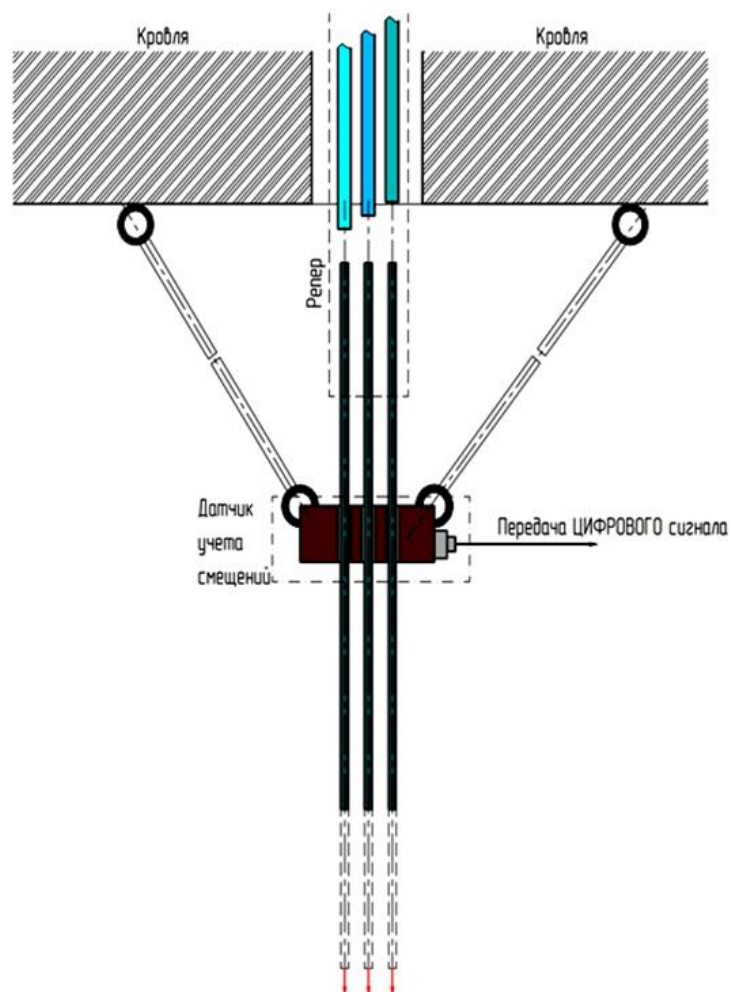


Рис. 3. Схема установки тела датчика
 Fig. 3. Sensor body installation diagram

3. Результаты исследований. Проведя анализ достоинств и недостатков различных преобразователей, относительно необходимых параметров можно сделать вывод, что наиболее приемлемыми в качестве датчика смещения кровли являются емкостные датчики линейных перемещений с изменяющейся площадью пластин. Основные преимущества емкостных преобразователей – простота устройства, высокая чувствительность, малое потребление энергии, отсутствие подвижных контактов, сравнительная простота изготовления, малые габариты и вес, долгий срок эксплуатации.

4. Обсуждения. Емкостный датчик линейных перемещений содержит набор пластин для формирования емкостного массива, который обладает высокой чувствительностью к перемещениям. Шаблон емкостных пластин, залитых эпоксидной смолой, наносится на неподвижную часть датчика (статор) (см. Рис. 1). Подвижная часть датчика (ротор) также содержит шаблон емкостей, разделенный на синусную и косинусную пластины. Таким образом, образуются два конденсатора, которые включаются последовательно, при этом верхняя пластина работает как общий электрод. Это помогает точно чувствовать все перемещения датчика.

5. Выводы. На основании вышеизложенного была разработана схема датчика учета смещений, принцип его функционирования: съем показаний, индикация, передача цифрового сигнала, особенности электропитания (Рис. 2).

Логика функционирования датчика на основании данной схемы построена следующим образом: при смещениях в кровле емкостный датчик линейных перемещений (Д) подает сигнал в цифровой преобразователь (ЦП), который отображает их на встроенном дисплее и формирует сигнал в блок передачи данных (БПД). БПД усиливает сигнал и передает в преобразователь сигнала (ПС), который связан с персональным компьютером (ПК), в котором планируется накопление и обработка статистических данных по смещениям в кровли для оперативного реагирования, о необходимости которого сигнализирует специально разрабатываемое для данного датчика программное обеспечение (ПО).

Функции датчика:

1) осуществлять изменения линейных параметров кровли с точностью до 1 мм.

2) передача результатов измерения на персональный компьютер со специальным ПО.

3) передача на персональный компьютер осуществляется при помощи локальной сети связи.

Работа датчика: в режиме реального времени с любым, заранее установленным интервалом

времени от долей секунды до нескольких минут датчик передает на сервер данные линейных параметров кровли.

Установка датчика:

Датчик должен иметь возможность крепиться к заранее установленному в кровлю реперу, настраивается на требуемый режим и после этого он готов к непрерывному мониторингу линейных параметров смещений в кровле. Схематично установку датчика на репер можно представить как на Рис. 3.

Таким образом, разработка системы учета смещений в кровле включает в себя решение целого ряда сложных научно-технических задач, среди которых проектирование и разработка датчика, разработка программного обеспечения для управления данными, считываемыми с датчика (датчиков), определение наиболее рационального пути передачи данных в сложных производственных условиях и т. д.

Несмотря на всю сложность поставленных задач, их решение позволит достичь нового уровня в обеспечении безопасности при ведении добычи угля подземным способом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство по проектированию подземных горных выработок и расчету крепи. Строительные нормы и правила. Часть II: нормы проектирования. Глава 94. Подземные горные выработки.
2. Фисенко Г. Л. Пределные состояния горных пород вокруг выработок. М. : Недра, 1976. 272 с.
3. Зубов В. П. Особенности управления горным давлением в лавах на больших глубинах разработки. Л. : Издательство Ленинградского университета, 1990. 224 с.
4. Беликов В. В. О механизме деформирования кровли повторно используемых выемочных выработок. // Изв. вузов. Сев.- Кавк. регион. Техн. науки. 2004. Приложение № 7. С. 54–63.
5. Лазерные датчики перемещения, внесены в Госреестр СИ РФ. http://www.sensor-systems.ru/product_205.html
6. Компоненты для автоматизации. <http://www.linedrive.ru/catalogue/sensors/linear/lt67.html>
7. Кольцевые датчики силы растяжения и сжатия. <http://www.megasensor.com/>
8. Заключение Кемеровского филиала АО ВНИМИ № 9 от 04.03.2016 г. «По результатам геофизического обследования оконтуренной лавы №66-05 по пласту 66 на шахте «Талдинская-Западная-1» с целью выявления аномальных тектонических зон и других участков изменения геомеханических характеристик кровли пласта и рекомендации по безопасному ведению горных работ в выделенных опасных зонах», 04.03.2016 г., 39 с.

9. Отчет по научно-исследовательской работе филиала КузГТУ в г. Прокопьевске №13 от 10.12.2016. Определение состояния кровли методом георадиолокации с выделением вероятных зон наличия трещиноватости, зон отслоившейся кровли, влагонасыщенных участков, Прокопьевск, 2015. 152 с.

10. Гаврилов В. А., Трофимов А. А. Система измерения линейных перемещений // Датчики и системы. 2005. № 9. С. 44–46.

11. Дмитриенко А. Г., Нефедьев Д. И., Трофимов А. А. Электромагнитный датчик линейных перемещений с торцевым сопряжением растров // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2015. № 2 (12). С. 4–10.

12. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден ; пер. с англ. Ю. А. Заболотной ; под ред. Е. Л. Свинцова. М. : Техносфера, 2005. 588 с.

13. Агейкин Д. И. Датчики контроля и регулирования / Д. И. Агейкин, Е. Н. Костин, Н. Н. Кузнецова. – М. : Машиностроение, 1965. – 928 с.

14. Шидлович Л. Х. Дифференциальные трансформаторы и их применение М., 1966. С. 78–86.

15. Дмитриенко А. Г., Трофимов А. Н., Трофимов А. А., Кирьянов В. Л. Математическая модель, расчет и оптимизация взаимоиндуктивных датчиков линейных перемещений // Датчики и системы. 2012. № 9. С. 16–19.11.

12. Koskov M. A., Somov S. A., Krylasova O. S., Ivanov A. S. Inertial Ferrofluidic Sensor for Vibration, Displacement and Impulse Measurement with a Linear Output Signal // Problems of the Regional Energetics. 2024. № 4(64). Pp. 80–89. DOI: 10.52254/1857-0070.2024.4-64.07. EDN HJWWHV.

13. Neshina Ye., Yugay V., Alkina A. [et al.] Hardware and Software Complex for Identification of Displacement Based on a Fiber-optic Sensor // Труды университета. 2024. № 3(96). Pp. 445–451. DOI: 10.52209/1609-1825_2024_3_445. EDN FDFTMB.

14. Магнитострикционные датчики линейных перемещений «ТрейсЛайн» // Информатизация и системы управления в промышленности. 2024. № 1(109). С. 75–77. EDN OPHFNV.

15. Коновалов Ю. В., Чупановский М. Г. Моделирование датчика линейных перемещений в электромеханической системе контроля высоковольтных выключателей // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Иркутск, 22–25 апреля 2025 года. Иркутск : Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2025. С. 63–67. EDN VPLANI.

16. Горячев В. Я. [и др.] Электрическая схема замещения информационно-измерительных систем линейных перемещений на основе фазового датчика Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2019. № 1(27). С. 5–11. DOI: 10.21685/2307-5538-2019-1-1. EDN ZSDBLN.

17. Калмакова А. В. [и др.] О возможности использования механотронного датчика линейных перемещений в приборе УПМ-2 для кинетического индентирования // Техника, технологии и перспективные материалы : Межвузовский сборник научных трудов / А. Д. Шляпин (отв. ред.). Москва : Московский государственный индустриальный университет, 2004. С. 126–130. EDN TYGYNX.

18. Белоновская И. Д. [и др.] Новые разработки датчиков линейных перемещений больших длин класса абсолют // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры : Материалы Всероссийской научно-методической конференции, Оренбург, 23–25 января 2019 года. Оренбург : Оренбургский государственный университет, 2019. С. 694–698. EDN YZBFUD.

19. Gu X. [et al.] An Inductive Linear Displacement Sensor With Bilateral Sensing Units // IEEE Sensors Journal. 2021. Vol. 21. № 1. Pp. 296–305. DOI: 10.1109/jsen.2020.3014674. EDN SPVJQE.

20. Yuan Z. Integrated Real-Time Pneumatic Monitoring System With Triboelectric Linear Displacement Sensor // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2023. Vol. 70. № 6. Pp. 6435–6441. DOI: 10.1109/tie.2022.3192690. EDN IIKBDY.

© 2025 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:

Пудов Евгений Юрьевич, директор, Филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева» в г. Прокопьевске (653039, Россия, Кемеровская область – Кузбасс, г. Прокопьевск, ул. Ноградская, 19а), кандидат технических наук, e-mail: pudov_evgen@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Пудов Евгений Юрьевич – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, формулировка терминов, разработка методологии, выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

SELECTING RATIONAL SOLUTIONS IN DEVELOPING A ROOF DISPLACEMENT SENSOR

Evgeniy Yu. Pudov

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, branch in Prokopyevsk

* for correspondence: pudov_evgen@mail.ru



Article info

Received:

08 August 2025

Accepted for publication:

10 October 2025

Accepted:

13 October 2025

Published:

23 October 2025

Keywords: displacement sensor, roof, massif condition, safety, displacement detection.

Abstract.

High-quality and fast execution of mine workings imposes high requirements on the reliability, productivity and a number of other criteria on the tunneling and cleaning equipment. In turn, coal and rock massifs require timely inspections and monitoring of their condition. Continuity and high accuracy of monitoring the condition of the coal and rock massif will allow predicting and avoiding dangerous consequences caused by unexpected roof collapses. These factors and the ever-increasing volumes of cleaning work require optimal methods of diagnostics and monitoring of the roof condition, which have such important properties as high reliability of results, convenience and efficiency of work, as well as minimization of labor and economic costs for their implementation, safety of implementation. One of the options for solving this problem is the development and implementation of sensors for determining displacements in the roof. The development team working on the project is considering several different options for the design of a potential displacement sensor in the roof. Several options based on different physical effects for detecting displacements, transmitting, and storing the data have been selected for experimental research. This article will explore the initial experimental and theoretical findings in this area. It is planned to continue with a series of articles that will provide insights into the development of this topic, including the practical implementation and testing of prototypes of both the sensors themselves and their integration with data processing, transmission, interpretation, and visualization systems. In the future, a special task will be to consider the specifics of integrating the received data with the security and alerting system of coal enterprises in the context of current requirements for industrial safety and a multifunctional security system. It is noteworthy that despite the presence of offers on the market for certain sensor designs, they have not generated significant interest in implementation due to a number of significant technical and economic shortcomings that should be avoided when implementing the new system.

For citation: Pudov E.Yu. Selecting rational solutions in developing a roof displacement sensor. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 5(171):185-192. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-185-192, EDN: FEYQDB

REFERENCES

1. Guide to Design of Underground Mine Workings and Calculation of Support Building codes and rules. Part II. Design codes. Chapter 94. Underground mining workings.
2. Fisenko G.L. Limit States of Rocks Around Workings. Moscow: Nedra; 1976. 272 p.
3. Zubov V.P. Features of Rock Pressure Management in Longwalls at Great Depths of Development. Leningrad: Leningrad University Publishing House; 1990. 224 p.
4. Belikov V.V. On the Mechanism of Roof Deformation in Reused Mining Workings. *News of*

Universities. North-Caucasian Region. Tech. Sciences. 2004. Appendix № 7. Pp. 54–63.

5. Laser displacement sensors are included in the State Register of Measuring Instruments of the Russian Federation. http://www.sensor-systems.ru/product_205.html

6. Components for automation. linedrive.ru/catalogue/sensors/linear/lt67.html

7. Ring tensile and compression force gauges. <http://www.megasensor.com/>

8. Conclusion of the Kemerovo branch of JSC VNIMI No. 9 dated 03/04/2016 "Based on the results of a geophysical survey of the contoured longwall No. 66-05 along seam 66 at the Taldinskaya-Zapadnaya-1 mine in order to identify anomalous tectonic zones and other areas of change in the geomechanical characteristics of the seam roof and recommendations for the safe conduct of mining operations in the identified hazardous areas", 03/04/2016, 39 p.

9. Report on the research work of the KuzSTU branch in Prokopyevsk, № 13, dated 10.12.2016. Determination of the roof condition using the ground penetrating radar method with the allocation of probable zones of cracking, zones of peeling roofing, moisture-saturated areas, Prokopyevsk, 2015. 152 p.

10. Gavrilov V.A., Trofimov A.A. System of Measuring Linear Displacements. *Sensors and Systems.* 2005; 9:44–46.

11. Dmitrienko A.G., Nefediev D.I., Trofimov A.A. Electromagnetic Sensor of Linear Displacements with End-to-End Interconnection of Rasters. *Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2015; 2 (12):4–10.

12. Fryden J. Modern Sensors. Handbook / J. Fryden ; translated from English by Yu.A. Zabolotnaya ; edited by E.L. Svintsov. Moscow: Tekhnosfera; 2005. 588 p.

13. Neshina Ye., Yugay V., Alkina A. [et al.] Hardware and Software Complex for Identification of Displacement Based on a Fiber-optic Sensor. *Proceedings of the University.* 2024; 3(96):445–451. DOI: 10.52209/1609-1825_2024_3_445. EDN FDFTMB.

14. TraceLine Magnetostrictive Linear Displacement Sensors. *Informatization and Control Systems in Industry.* 2024; 1(109):75–77. EDN OPHFNV.

15. Konovalov Yu.V., Chupanovsky M.G. Modeling of a Linear Displacement Sensor in an Electromechanical Control System for High-Voltage Switches. *Improving the Efficiency of Production and Energy Use in Siberia: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation.* Irkutsk, April 22–25, 2025. – Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2025. Pp. 63–67. EDN VPLAHI.

16. Goryachev V.Ya. [et al.] Electrical substitution scheme of information and measurement systems of linear displacements based on a phase sensor. *Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2019; 1(27):5–11. DOI: 10.21685/2307-5538-2019-1-1. EDN ZSDBLN.

17. Kalmakova A.V. [et al.] On the Possibility of Using a Mechanotron Linear Displacement Sensor in the UPM-2 Device for Kinetic Indentation. *Technique, Technologies, and Promising Materials: Interuniversity Collection of Scientific Papers.* A.D. Shlyapin (ed.). Moscow: Moscow State Industrial University; 2004. Pp. 126–130. EDN TYGYNX.

18. Belonovskaya I.D. [et al.] New Developments of Absolute-Class Large-Length Linear Displacement Sensors. *University Complex as a Regional Center of Education, Science, and Culture: Proceedings of the All-Russian Scientific and Methodological Conference.* Orenburg, January 23–25, 2019. Orenburg: Orenburg State University; 2019. Pp. 694–698. EDN YZBFUD.

19. Gu X. [et al.] An Inductive Linear Displacement Sensor With Bilateral Sensing Units. *IEEE Sensors Journal.* 2021; 21(1):296–305. DOI: 10.1109/jsen.2020.3014674. EDN SPVJQE.

20. Yuan Z. [et al.] Integrated Real-Time Pneumatic Monitoring System With Triboelectric Linear Displacement Sensor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics.* 2023; 70(6):6435–6441. DOI: 10.1109/tie.2022.3192690. EDN IIKBDY.

© 2025 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:

Evgeny Yu. Pudov, Director, Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kuzbass State Technical University named after T. F. Gorbachev" in Prokopyevsk (653039, Russia, Kemerovo Region-Kuzbass, Prokopyevsk, Nogradskaya St., 19a), Candidate of Technical Sciences, e-mail: pudov_evgen@mail.ru

Contribution of the authors:

Evgeny Yu. Pudov – formulation of a research task, scientific management, review of relevant literature, conceptualization of research, formulation of terms, development of methodology, conclusions, writing the text;

All authors have read and approved the final manuscript.

