

## Возможности использования самозапитывающихся датчиков, предназначенных для работы в подземных выработках шахт

*В статье авторы обращаются к способу питания датчиков, используемых для мониторинга интеллигентных машин и зданий. Обсуждаются все чаще используемые датчики "с автономным питанием", которые для питания своих структур используют энергию, образующуюся во время таких физических явлений, как: передача тепла, вибрации или солнечное излучение (анг. energy harvesting – аккумулярование энергии). Представляются возможности внедрения системы самозапитывающихся датчиков в машинах, используемых в пространствах опасных по взрыву метана и/или угольной пыли, в том числе в системах автоматики и диагностики машин и горно-шахтного оборудования.*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

---

Развитие систем мониторинга и автоматизации горно-шахтных машин и оборудования вынуждает разрабатывать и внедрять интеллигентные решения. В случае работы оборудования во взрывоопасных пространствах необходимо использовать специальные конструкции, которые соответствуют требованиям директивы АТЕХ. В соответствии с постановлением Министра экономики от 22 декабря 2005 года (Вестник Законов № 263, поз. 2203) оборудование и защитные системы, предназначенные для использования во взрывоопасных пространствах, должны иметь надлежащую защиту в виде взрывобезопасной конструкции. Правовым актом, действующим в данной области на всей территории Европейского союза, является Директива 94/9/ЕС (АТЕХ). Общие требования к конструкции электрооборудования, используемого во взрывоопасных пространствах, содержатся в стандарте PN-EN 60079-0, гармонизированном с Директивой АТЕХ. В настоящее время все более популярными становятся распределённые системы управления, основанные на промышленных сетях (например, построенных на основе магистрали CAN), которые предоставляют возможность ограничить количество кабеля. На практике, однако, необходимо прокладывать сетевой кабель и кабель питания (часто в одном кабеле). Используются

также датчики, которые сообщаются при помощи беспроводной сети, но для них также необходимо прокладывать кабель питания (как вариант они питаются от аккумулятора).

В системах мониторинга машин и интеллигентных зданий всё более востребованными становятся датчики "с автономным питанием", использующие для питания энергию, преобразованную во время таких физических явлений, как: передача тепла, вибрации или солнечное излучение (анг. energy harvesting – аккумулярование энергии). Проведённый анализ используемых решений показал, что существуют возможности применения их в системах автоматизации и диагностики машин и оборудования для горнодобывающей промышленности. Можно указать следующие возможности их применения [1]:

- модернизация существующих систем управления,
- передача измерительных сигналов от движущихся элементов машин,
- портативная диагностическая аппаратура.

### 2. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В КОНСТРУКЦИИ ДАТЧИКОВ

---

Проведённый анализ доступной литературы [3, 4] и существующих решений, не предназначенных для

оборудования, работающего в пространствах опасных по взрыву метана и/или угольной пыли [5, 8, 9, 10, 11], указал на возможности создания системы самозапитающихся датчиков. С точки зрения получения энергии из механических вибраций проанализировано решения в области электромагнитных и пьезоэлектрических преобразователей как потенциальных источников питания датчиков, входящих в состав системы [5, 7, 8, 9, 10, 11]. Также проанализировано решения для термоэлектрических и фотоэлектрических преобразователей [2].

**Электромагнитный преобразователь** использует закон Фарадея о том, что в проводнике, размещённом в переменном магнитном поле, индуцируется электродвижущая сила.

Переменное магнитное поле создаётся чаще всего движущимися магнитами, а в качестве проводника служат соответственно построенные системы катушек.

Фирма Tremont Electric Company представила способ применения электромагнитного преобразователя

в виде переносного зарядного устройства nPower® PEG (рис. 1a) [10], которое может использоваться в качестве зарядного устройства во время ходьбы (минимальное движение создаёт сигнал с мощностью 1 мВт).

Следующим примером применения электромагнитного преобразователя являются электромагнитные фонарики [11] (*Electromagnetic Flashlight* – рис. 1b), не требующие использования батареек. Генерируемая электроэнергия аккумулируется в конденсаторе. Недостатком устройства является необходимость резкого потряхивания ним в течение не менее двух минут для зарядки конденсаторов. Аккумулированной энергии хватает на несколько минут освещения.

Примером устройства, использующего принцип работы электромагнитного преобразователя, является также датчик вибрации PMG17 фирмы Perpetuum (рис. 2) [9]. Он использует механические вибрации машин, питаемых переменным напряжением.

a)

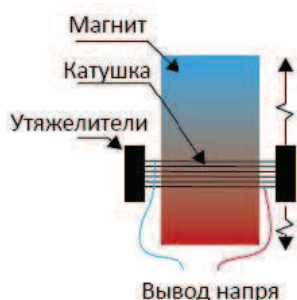


b)



Рис. 1. a) nPower® PEG [10], b) электромагнитный фонарик (*Electromagnetic Flashlight*) [11]

a)



b)



Рис. 2. Датчик вибрации PMG17 [9]: a) схема работы PMG17; b) общий вид

**Пьезоэлектрические преобразователи** используют явление, заключающееся в создании под воздействием механических нагрузок электрических зарядов на поверхности пьезоэлектрического материала. Пьезоэлектрический элемент помещается в устройство таким образом, чтобы обеспечить максимальное использование энергии механических явлений, происходящих в устрой-

стве [3, 4]. На рисунке 3 представлены пьезоэлектрические элементы, используемые для генерирования энергии в результате механических деформаций, т.е. сенсор из пьезопластины предназначенный для мониторинга машин, детектирования акустической и сверхакустической эмиссии, т.е. выявления вибрации и ударов (3a), а также пленка из пьезопластины (3b).

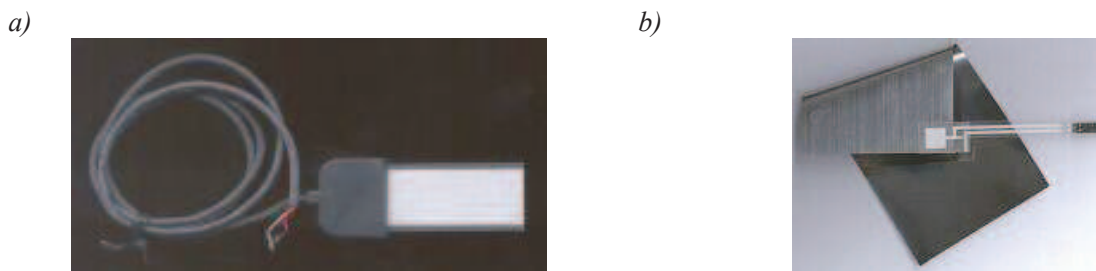


Рис. 3. Сенсор для выявления вибрации и ударов: а) сенсор из пьезопластины [5]; б) пьезоплёнка [8]

Интересным фактом о возможности применения пьезоэлектрических преобразователей является

принцип «пьезоэлектрического дерева», генерирующего энергию во время порыва ветра (рис. 4) [7].

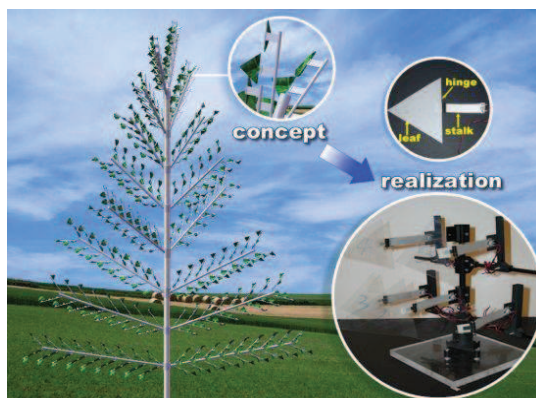


Рис. 4. Пьезоэлектрическое дерево [7]

**Фотоэлектрические преобразователи** являются следующей группой, которая может использоваться в процессе создания элементов системы. Фотоэлектрические преобразователи преобразовывают энергию солнечного излучения в электрическую энергию в результате фотовольтаического эффекта, который заключается в перемещении в р-n-Переходе носителей электрических зарядов между энергетическими зонами под воздействием фотонов. Перемещение зарядов приводит к возникновению разницы потенциалов, и, следовательно, электрического напряжения.

Данные преобразователи находят применение в фотоэлементах. Используются они для создания солнечных батарей. Батареи состоят из последовательно объединённых фотоэлементов в количестве, которое позволяет генерировать ток с полезной силой.

**Термоэлектрические преобразователи – рекуперация тепловой энергии.** Явление рекуперации заключается в восстановлении тепловой энергии [2]. Для преобразования, например, тепловой энергии в электрическую используются термогенераторы – устройства, которые производят электрическую энергию в результате разницы температур и потока тепловой энергии, вызванного данной разницей. Существуют два основных

типа термогенераторов – основанные на эффекте Зеебека (элементы Пельтье) и использующие явление, происходящее в двигателе Стирлинга.

Элементы Пельтье основаны на термоэлектрическом явлении Зеебека (эффект Зеебека), заключающимся в возникновении электродвижущей силы (также называемой термоэлектрической силой) в цепи, состоящей из двух различных материалов, контакты которых имеют разные температуры [2]. Является оно результатом зависимости контактной разности потенциалов между материалами от температуры. Контактная разность потенциалов возникает в результате диффузии электронов через поверхность контакта от одного материала к другому. [2].

Современный элемент Пельтье – это две тонкие пластины из теплопроводящего изоляционного материала (керамический оксид алюминия), между которыми помещен последовательный ряд элементарных полупроводников, попеременно "р"-типа и "n"-типа (рис. 5). Полупроводники в виде "столбиков", изготовленных из теллурида висмута, смешанного соответствующим образом с сурьмой и селеном, соединены последовательно благодаря медным дорожкам на внутренних поверхностях пластин, образующих керамический корпус.

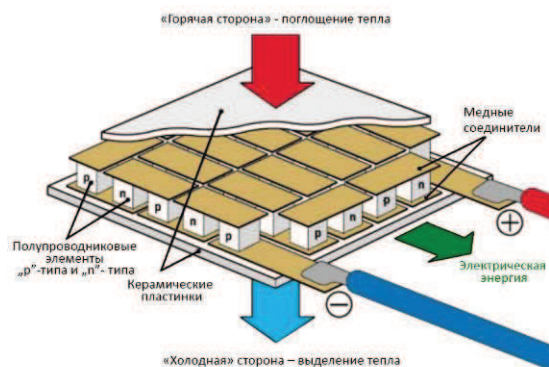


Рис. 5. Конструкция и принцип работы элемента Пельтье [2]

### 3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УСЛОВИЙ РАБОТЫ МАШИН

Проектирование и модернизация систем управления шахтных машин требует разработки нового способа прокладки кабелей питания и управления в соответствующем месте, без угрозы их повреждения. Способом удовлетворения данных требований может быть применение датчиков с «автономным питанием», использующих, например, энергию вращательного движения, механических вибраций или потока тепла. Выработка энергии может происходить в результате [1]:

- вращательного движения частей машин и использоваться для определения:
  - температуры роликов ленточного конвейера – энергия, вырабатываемая в результате вращения ролика, используется для питания датчика температуры (генератор внутри ролика); данный датчик может иметь большое значение для пожарной безопасности,
  - положения погрузчика очистного комбайна – из-за ограничений, связанных с прокладкой кабеля, можно использовать абсолютный датчик угла поворота, питаемый энергией, возникающей в результате вращательного движения погрузчика; в связи с небольшим углом перемещения погрузчика и высоким вращательным моментом будет необходимо выполнение передачи мультиплексирования оборотов,
  - положения стрелы проходческого комбайна – также как в случае погрузчика очистного комбайна, можно использовать самозапитывающийся датчик, измеряющий положение стрелы (обязательна мультипликация оборотов),
  - положения ковша погрузочной машины – также как в выше перечисленных случаях, можно использовать самозапитывающийся абсолютный датчик угла поворота, измеряющий положение ковша (обязательна мультипликация

оборотов); дополнительно датчик также можно оснастить тензометрической системой или элементом для измерения давления, предназначенным для определения массы горной руды, транспортируемой в ковше,

- энергии механических вибраций и использоваться для определения:
  - температуры выбранных конструкционных узлов машин – в случае машин можно использовать энергию вибраций для питания сенсоров, измеряющих температуру; это предоставляет возможность измерять температуру в любом месте и изменять положение датчика во время эксплуатации машины,
  - давления в гидравлической системе – использование энергии, генерируемой в результате вибраций для питания датчиков давления,
  - вибраций (вибродиагностика) – возможность создания самозапитывающегося датчика, измеряющего вибрации работающей машины для нужд вибродиагностической системы,
  - натяжения цепи скребкового конвейера – возможность создания элемента, преобразовывающего энергию в результате натяжений в специально сконструированном измерительном элементе, оборудованном пьезоэлектрической системой.

### 4. КОНЦЕПЦИЯ СИСТЕМЫ САМОЗАПИТЫВАЮЩИХСЯ ДАТЧИКОВ

Разработке системы самозапитывающихся датчиков, предназначенных для эксплуатации в пространствах опасных по взрыву метана и/или угольной пыли, предшествовало проведение анализа в области потребностей рынка и технических возможностей выполнения проекта. На его основе установлено, что необходимо ответить на следующие вопросы:

- Какие ограничения по использованию предлагаемой системы, возникающие в связи с её использованием в пространствах опасных по взрыву метана и/или угольной пыли, существуют?
- Какими являются требования в области частоты подачи измерительного сигнала датчиком?
- Какие методы установки преобразователей следует использовать, чтобы соответствовать требованиям законодательных актов?
- Какие способы монтажа датчиков в машине/оборудовании можно использовать?
- Как решить вопрос радиопередачи (в контексте корпуса датчика)?
- Каким образом выполнять настройку пьезоэлектрического преобразователя на требуемую частоту работы?

- Каким образом обеспечить достаточный перепад температур по обе стороны термоэлектрического преобразователя?

Концепция системы самозапитывающихся датчиков предполагает установку на конструкции машины/оборудования любого количества беспроводных датчиков (рис. 6), передающих сообщения по радиосвязи к приемнику. В случае стационарной системы мониторинга приемник может устанавливаться на постоянной основе, и подключаться к шахтной телекоммуникационной сети. В случае мобильной системы мониторинга приемником может быть карманный персональный компьютер с модулем беспроводной связи.



Рис. 6. Общая структура системы [1]

Использование системы самозапитывающихся датчиков предоставит возможность разработать инновационную систему мониторинга выбранных параметров работы машины или оборудования. Система будет предназначена для использования в шахтах - в пространствах опасных по взрыву метана и/или угольной пыли. В отношении электронных устройств самым лучшим способом защиты является искробезопасная конструкция, задачей которой является ограничение электрической энергии в устройстве (вместе с его системой внутренней электропроводки), имеющим контакт с взрывоопасной атмосферой, до такого уровня, который не может привести к воспламенению в результате как искрения, так и нагрева. Требования к конструкции данного типа указаны в стандарте PN-EN 60079-11. Проведено предварительный анализ возможности применения самозапитывающихся датчиков, оснащённых пьезоэлектрическими преобразователями. Стандарт EN 60079-11:2007 говорит о необходимости проведения механического тестирования устройств, содержащих пьезоэлек-

трические элементы: «Необходимо измерить как ёмкость элемента, так и напряжение, существующее на нём, когда стойкость к ударам каждой части оборудования, доступной во время эксплуатации, испытывается при температуре (20/-10)°C (...). За величину напряжения следует принять более высокое значение, полученное в результате двух тестов на том же самом образце. (...) Максимальная энергия, аккумулированная емкостью кристалла при максимальном измеренном напряжении, не должна превышать следующих значений: в случае устройств **группы I** 1500 мкДж» (EN 60079-11:2007 пункт 10.7). Если максимальное значение выходной энергии данного оборудования превышает значение, указанное в пункте 10.7 стандарта EN 60079-11:2007, предлагается установить пьезоэлектрический элемент в герметичной оболочке, а затем залить её заливочной массой и поместить в корпус, устойчивый к механическим воздействиям, т.е. обеспечивающий соответствие условиям категории M1 (с уровнем защиты "иa" – непрерывная работа устройства в метановой среде).

## 5. КОНЦЕПЦИЯ БЕСПРОВОДНОГО ДАТЧИКА, ПИТАЕМОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

Концепция беспроводного датчика, питаемого пьезоэлектрическим преобразователем, представлена на рис. 7.

Датчик состоит из четырех модулей:

- измерительного элемента – в зависимости от типа датчика может быть ним, например, пьезоэлектрический элемент для измерения вибраций, силы или давления, термопары для измерения температуры и т.д.
- процессора – физический параметр измеряемый датчиком преобразуется из аналоговой в цифровую форму, что обеспечивает его передачу по радиосвязи,
- системы радиопередачи данных – на основе анализа существующих на рынке систем передачи данных было установлено, что стандар-

том радиобмена данных, наиболее подходящим для использования в беспроводных датчиках, является стандарт ZigBee, система радиопередачи предназначена для передачи обработанного цифрового сигнала к приемнику,

- питание – в типичных беспроводных датчиках используется аккумуляторное питание; в рамках разработанной концепции был предложен альтернативный (базирующийся на пьезоэлектрических преобразователях) источник питания для всех компонентов датчика.

Питание датчика в случае приложения *energy harvesting* состоит из трех основных модулей:

- преобразователя энергии (пьезоэлектрического, индуктивного, элемента Пельтье, фотоэлектрического),
- преобразователя, предназначенного для приложения *energy harvesting*,
- элемента, аккумулирующего энергию (суперконденсатор, аккумулятор).



Рис. 7. Схема беспроводного датчика [1]

### 5.1. Подбор пьезоэлектрического преобразователя

Пьезоэлектрические преобразователи, предназначенные для приложений *energy harvesting*, обычно имеют параметры, соответствующие рекуперации энергии низкочастотных колебаний от 30 до 100 Гц.

В рамках концептуальных работ были выбраны пьезоэлектрические преобразователи, которые могут найти применение в конструкциях систем питания беспроводных датчиков. Преобразователи были выбраны на базе обзора литературы, посвященной этому вопросу, и опыта специалистов Департамента мехатронных систем Института КОМАГ [1, 6]:

- V21BL-ND (производства фирмы MIDE, рис. 8) – преобразователь характеризуется узким диапазоном резонансной частоты и настраивается на определенную резонансную частоту путём добавления сейсмической массы в конце листка. Напряжение, генерированные преобразователем, изменяется в зависимости от частоты работы и отклонения преобразователя. На рис. 9а представлена зависимость мощности от напряжения при частоте работы 50 Гц. В буклете преобразователя указана масса, которой необходимо утяжелить преобразователь, и амплитуда отклонения, необходимые для достижения определённого выходного напряжения.

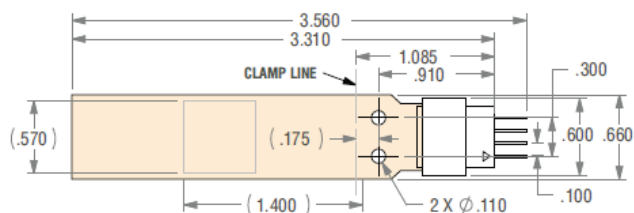


Рис. 8. Пьезоэлектрический преобразователь V21BL-ND (размеры в дюймах) [6]

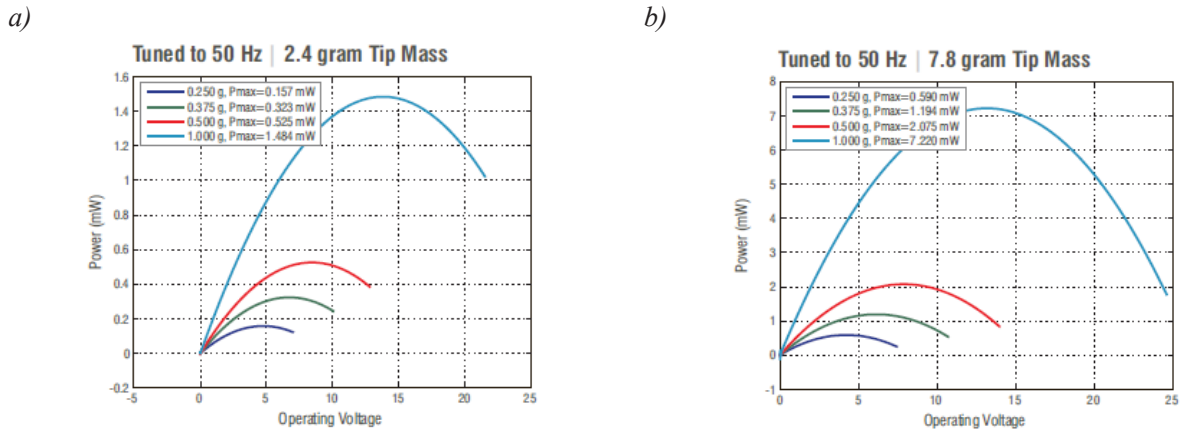


Рис. 9. Характеристики работы пьезоэлектрических преобразователей при 50 Гц [6]:  
 а) V21BL-ND; б) V25W-ND

- **V25W-ND** (производства фирмы MIDE, рис. 10) – параметры преобразователя, также как V21BL-ND, указаны в буклете производителя. На рис. 9б представлена зависимость вырабатываемой мощности от напряжения при частоте работы 50 Гц.

Предварительные лабораторные испытания перечисленных преобразователей, проведённые в Институте КОМАГ, подтвердили их применимость в проектируемой системе датчиков. Из-за размеров преобразователей в последующих концептуальных работах было сосредоточено на преобразователе V21BL-ND.

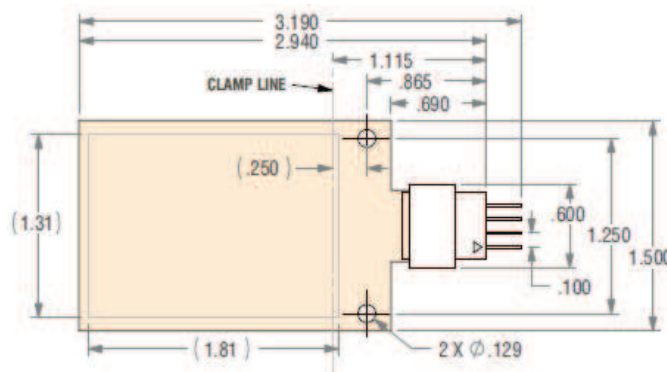
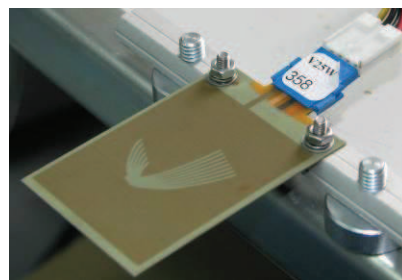


Рис. 10. Пьезоэлектрический преобразователь V25W-ND (размеры в дюймах) [1, 6]

### 5.2. Концепция установки пьезоэлектрического преобразователя

Проект корпуса датчика выполнено в двух версиях. Первая учитывает сведённые к минимуму размеры электронной системы. На рисунке 11а представлена 3D модель датчика и способ его монтажа.

Метод установки пьезоэлектрического преобразователя в 1 версии является удобным в связи

с его техническим обслуживанием, но анализ, проведённый на тему исполнения датчика в искробезопасной версии, показал, что корпус должен составлять одно целое и следовало бы его залить соответствующей заливочной массой для электронных систем, навсегда исключая доступ к электронной системе и пьезоэлектрическому преобразователю. Такие изменения были внесены в 2 версию датчика (рис. 11б):

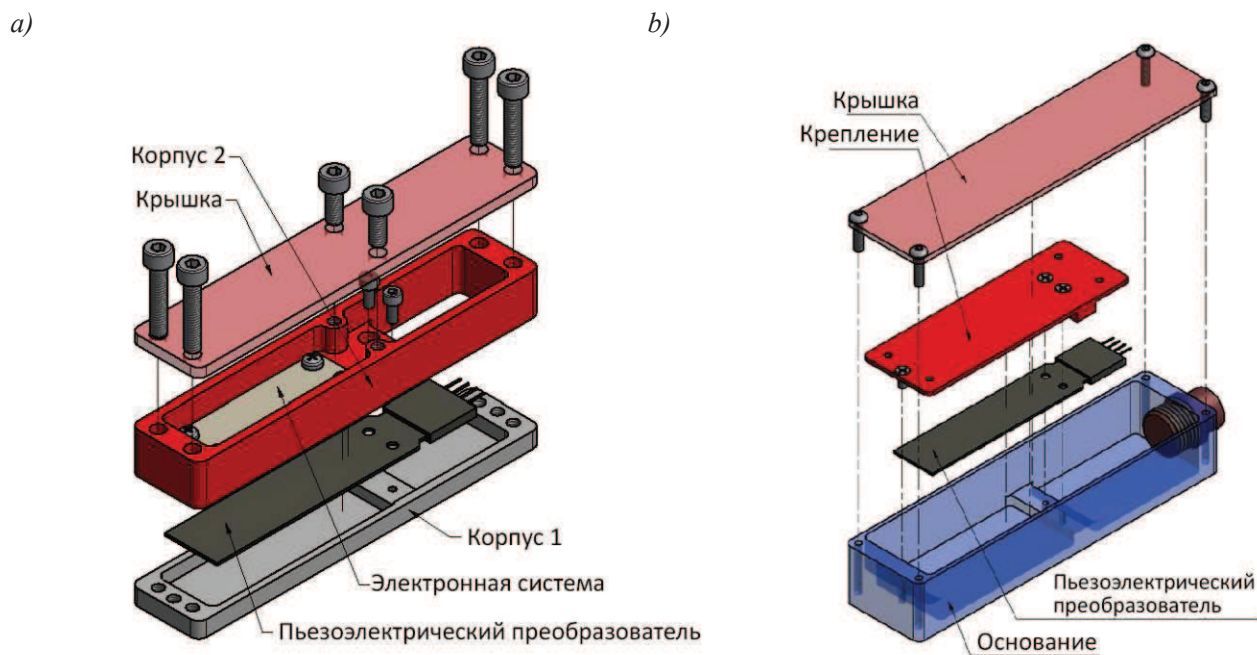


Рис. 11. 3D модель беспроводного датчика [1]: а) версия 1; б) версия 2

- увеличено размеры электронной системы,
- корпус датчика выполнено в виде одного элемента (существует возможность залить корпус смолистой заливочной массой),
- отизолировано камеру пьезоэлектрического преобразователя,
- предусмотрено выполнение пластиковой крышки, обеспечивающей работу радиосистемы.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проектирование интеллектуальных систем управления горно-шахтных машин требует решения проблемы прокладки кабелей питания и управления в соответствующем пространстве без риска повреждения. Указанную проблему можно решить путём применения датчиков с «автономным питанием», использующих энергию, генерируемую в результате: вращательного движения, механических вибраций и теплового потока.

В статье представлены возможности применения системы самозапитающихся датчиков в машинах, работающих в пространствах опасных по взрыву метана и/или угольной пыли. Представленная концепция системы самозапитающихся датчиков и датчика, питаемого пьезоэлектрическим преобразователем, учитывает требования, связанные с работой системы в данном пространстве, т.е. отвечает критериям категории М1. В результате её внедрения можно будет выпол-

нять мониторинг параметров, которые до настоящего времени не измерялись из-за технических трудностей, но которые имеют важное значение с точки зрения безопасности. В качестве примера можно привести температуру роликов ленточного конвейера.

## Литература

1. Jasiulek D. i in.: *Alternatywne źródło zasilania czujników stosowanych w górnictwie*, ITG KOMAG, Gliwice 2012, niepublikowane.
2. Woszczyński M., Stankiewicz K.: *Perspektywy rozwoju systemów rekuperacji i konwersji energii cieplnej w maszynach górniczych napędzanych silnikami spalinowymi*, KOMTECH 2009, Monografia ITG KOMAG, Gliwice 2009.
3. Xu-rui Chen, Tong-qing Yang, Wei Wang, Xi Yao: *Vibration energy harvesting with a clamped piezoelectric circular diaphragm*, *Ceramics International* 38S (2012), стр. 271-274, Available online 5 May 2011.
4. Hui Shena, Jinhao Qiu, Marco Balsi: *Vibration damping as a result of piezoelectric energy harvesting*, *Sensors and Actuators A* 169 (2011), стр. 178-186.
5. Буклет пьезоэлектрического преобразователя Measurement Specialties LDT0-028K.
6. Буклет пьезоэлектрических преобразователей MIDE Vulture.
7. Веб-страница <http://www.environmentteam.com/2010/02/06/piezoelectric-tree-to-produce-electricity-from-wind-energy/>.
8. Веб-страница <http://www.powerauditing.com/piezolaminaty/czujniki/>.
9. Веб-страница фирмы PERPETUUM: <http://www.perpetuum.com>.
10. Веб-страница фирмы Power PEG: <http://www.npowerpeg.com>.
11. Веб-страница фирмы NightStarCanada: <http://www.nightstarcanda.com/>.

Статья рецензирована двумя независимыми рецензентами.