

УДК 621.87; 681.58

Д.И. БОЧКАРЁВ, канд. техн. наук, доц.

декан строительного факультета¹

E-mail: bochk_dmitr@mail.ru

Д.С. ПУПАЧЁВ

ассистент кафедры «Детали машин, путевые и строительные машины»¹

E-mail: dimati1990@tut.by

¹Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 12.01.2019.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В КОНСТРУКЦИЯХ МОБИЛЬНЫХ МАШИН

В статье рассмотрен современный уровень развития пьезопреобразователей на основе керамики, композитных и пленочных материалов, их конструктивные особенности, преимущества и недостатки. На основании отмеченных свойств пьезоэлектрических компонентов предложены возможности их использования в конструкциях продукции машиностроительной отрасли в качестве элементов рекуперативных энергосберегающих систем.

Ключевые слова: пьезоэффект, преобразователь, энергия, машина, механизм, энергоэффективность, рекуперация

Введение. Повышение энергоэффективности машин и оборудования при их разработке и эксплуатации является одним из приоритетных направлений. Комбинированные рекуперативные приводы, системы автоматизации и интеллектуализации становятся неотъемлемой частью современной продукции машиностроения.

Конструктивно внедрение этих систем предполагает установку аккумулирующих и энергосберегающих устройств, применение электронных компонентов пропорционального управления, бортовых компьютеров с комплектами датчиков и электронными блоками управления, объединенными в единую сеть, например, при помощи шин типа CAN, а также использование различных способов рекуперации энергии [1–4].

С учетом вышесказанного становится очевидно, что их внедрение значительно усложняет конструкцию машин и механизмов, увеличивает материалоемкость и в конечном итоге — стоимость готового изделия.

Данная ситуация способствует поиску альтернативных направлений повышения энергоэффективности машин, базирующихся на новых принципах. Одним из возможных решений может быть использование пьезоэлектрических преобразователей генераторного типа (пьезогенераторов). Принцип их действия заключается в электрической поляризации пьезоэлектриков (сегнетоэлектриков, ферроэлектриков) при механическом напряжении в материале, что в конечном итоге позволяет создавать малогабаритные независимые источники энергии [5].

Типология применяемых пьезопреобразователей.

Использование явления пьезоэффекта на сегодняшний день вышло на новый уровень развития ввиду применения искусственно созданных многокомпонентных материалов. Выпускаемые пьезоэлектрические материалы на базе поликристаллов (пьезоэлектрические керамические материалы или ПКМ) представляют собой сегнетоэлектрические соединения или их твердые растворы, полученные синтезированием из смеси различных оксидов и солей. Основу большинства современных ПКМ составляют твердые растворы титаната-цирконата свинца (ЦТС, PZT), модифицированные различными компонентами и добавками. Выпускаются также ПКМ на основе титаната бария (ТБ), титаната свинца (ТС), ниобата свинца (НС), титаната висмута (ТВ) и т. д.

Пьезокерамика обладает рядом преимуществ. Технология ее производства проста, она имеет высокую стойкость к действию агрессивных сред и радиации. Пьезодатчики на основе ПКМ охватывают широкий диапазон измерений, способны работать при температурах от +400 до –270 °С и, что немаловажно, выдерживают высокие давления (для керамики типа PZT значения допустимых напряжений могут достигать до $(0,7–1,0) \cdot 10^8$ Па).

Кроме того, для улучшения выходных характеристик пьезопреобразователей из данных материалов можно использовать их системы в виде биморфов (состоящих из двух пьезоэлементов или пьезоэлемента и металлической пластины, соединенных между собой) или триморфов (состоящих из двух пьезоэлементов и металлической

пластины, объединенных с усилителями напряжения или заряда) [6].

Разрабатываемые изначально для использования в малогабаритной бытовой технике и устройствах беспроводной электроники, пьезогенераторы на основе керамики начинают находить новое применение, например, для систем освещения и сигнализации, в беспроводных сенсорных системах для наблюдения и диагностики технического состояния и т. д. Так, в 2008 году в Токио на станции метро Marunouchi компанией JR East Group проводился опыт по их установке в зале для приобретения билетов [7]. С 2009 по 2013 год фирмой Innowattech Ltd (Израиль) осуществлялся ряд исследовательских проектов, направленных на испытание и внедрение пьезогенераторов собственной разработки IPEG в дорожные полотна автострад и рельсошпальные решетки железных дорог [8]. В Великобритании фирмой Perpetuum Ltd проведены успешные испытания автономных детекторов износа колесных пар подвижного состава, состоящих из пьезогенератора, датчика вибраций с микропроцессором и радиопередатчика [9].

В последнее время начинают внедряться в производство пьезопреобразователи на основе композиционных материалов, представляющих собой многофазные системы, в которых одна фаза является сегнетоэлектриком, а оставшийся объем заполнен одно- или многокомпонентной органической связкой или другими фазами [10]. Основными преимуществами композиционных материалов по сравнению с обычной пьезокерамикой являются: высокие значения объемной пьезочувствительности и объемного пьезомодуля (способность пьезоэлемента генерировать электрическое поле и электрический заряд), низкая плотность и низкое значение механической добротности (характеризует потери энергии в свободно колеблющейся пластине).

Одновременно с этим получает дальнейшее развитие технология изготовления пленочных пьезоэлектрических элементов на основе поливинилденфторида (ПВДФ, PVDF) с толщиной готовых элементов от 5 до 100 мкм. Разрабатываются проекты по их автоматической сборке в многослойные конструкции, имеющие выходное напряжение от 2 до более чем 200 В.

Отличительными особенностями пленочных пьезопреобразователей являются возможность подвергаться значительно большим деформациям, в сравнении с обычной пьезокерамикой, а также временная стабильность (т. е. сохранение чувствительности в процессе хранения и эксплуатации). Кроме того, пьезоэлектрические пленки обладают следующими уникальными свойствами [11]: высоким выходным напряжением (в 10 раз выше, чем у пьезокерамики при одинаковых приложенных силах), высокой механической прочностью и ударостойкостью, высокой стабильностью, легкостью сборки и др.

Тем не менее, все отмеченные выше виды пьезопреобразователей обладают рядом недостатков. Данные устройства являются преобразователями, а не источниками энергии, и вырабатывают небольшие токи малой длительности. При этом для их эффективной работы требуется наличие дополнительных устройств (усилителей и т. д.), усложняющих конструкцию всей системы и, как следствие, снижающих ее надежность, а также накопителей энергии (АКБ, конденсаторы и т. д.).

Однако отмеченные выше достижения в области пьезоматериаловедения открывают значительные перспективы для внедрения пьезогенераторов в элементы конструкций различных машин и механизмов, подвергающихся циклическим нагрузкам и вибрациям.

Эффективность их внедрения можно определить при помощи типового расчета. Так напряжение, возникающее при однократном приложении нагрузки, можно определить по формуле

$$U_1 = \frac{d_{33}F}{C}, \quad (1)$$

где d_{33} — пьезоэлектрический модуль, для материала PZT-5H $d_{33} = 593 \cdot 10^{-12}$ К/Н [3]; F — сила, воздействующая на элемент конструкции с закрепленным преобразователем, примем $F = 12500$ Н; C — электрическая емкость пьезоэлектрического преобразователя

$$C = \frac{e\epsilon_0 S}{l}, \quad (2)$$

где e — диэлектрическая проницаемость материала пьезоэлектрического преобразователя, для материала PZT-5H $e = 5000$; ϵ_0 — электрическая постоянная, $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; S — площадь пьезоэлектрического преобразователя, примем $S = 0,01$ м²; l — толщина пьезоэлектрического преобразователя, примем $l = 0,01$ м.

Тогда

$$C = \frac{5000 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 0,01}{0,01} = 4,427 \cdot 10^{-8} \text{ Ф.}$$

Следовательно

$$U_1 = \frac{593 \cdot 10^{-12} \cdot 12500}{4,427 \cdot 10^{-8}} = 167,4 \text{ В.}$$

Сила тока I , возникающая на электродах одного преобразователя при однократном приложении нагрузки, составляет 0,01 А. Тогда элемент конструкции машины или механизма, подвергающийся нагрузке с циклическостью до 50 воздействий в минуту, с двумя присоединенными преобразователями может вырабатывать электрическую энергию мощностью

$$P = U_1 \cdot I \cdot n_1 \cdot n_2, \quad (3)$$

где n_1 — цикличность приложения нагрузки, ед/мин; n_2 — количество используемых преобразователей, шт.

Отсюда

$$P = 167,4 \cdot 0,01 \cdot 50 \cdot 2 = 167,4 \text{ Вт.}$$

При непрерывной работе за один час времени преобразователи смогут вырабатывать электрическую энергию мощностью до 10 044 Вт (без учета потерь).

Перспективы использования пьезопреобразователей. Одним из возможных перспективных направлений применения пьезопреобразователей в машинах и механизмах может стать их использование в качестве компонентов систем рекуперации энергии, интегрированных в рабочие органы или элементы силовых конструкций.

В частности, основой для реализации данных решений в сфере производственного оборудования могут служить станки или инструмент, совершающие возвратно-поступательное или сложное движение рабочих органов и оказывающие силовое воздействие на обрабатываемый элемент импульсами. Установленные в поворотных столах или узлах закрепления рабочего инструмента пьезопреобразователи могут генерировать энергию, необходимую для питания, например, датчиков систем ЧПУ, или частично компенсировать затраты электроэнергии на работу самих станков.

Сфера транспорта открывает еще больше возможностей для применения пьезогенераторов. В настоящее время предлагаются варианты использования пьезоэлектрических компонентов в пневматических шинах грузовых и легковых автомобилей (рисунок 1). Это позволит вырабатывать электроэнергию из деформаций, возникающих при качении колес в процессе движения машин [12, 13]. Так в покрышках концерна Continental (Германия) используются датчики системы eTIS (Electronic Tire Information System), установленные на стадии производства под ленту протектора. Они предназначены для контроля давления, степени износа и возникающих нагрузок [14]. Главной проблемой в реализации данного направления является сложность передачи выработанной энергии к системам машины ввиду невозможности применения токопроводящих элементов и необходимости использования беспроводных методик (на основе электромагнитной индукции и др.). Это, в свою очередь, требует внесения дополнительных изменений в конструкцию покрышек.

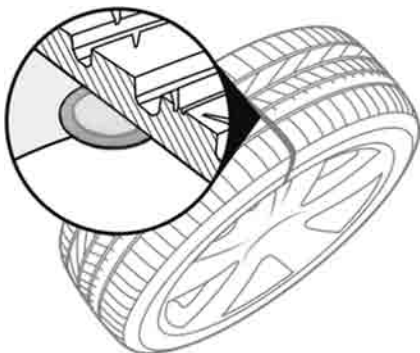


Рисунок 1 — Установка пьезогенератора в протекторе шины
Figure 1 — Piezoelectric generator installation in tire tread

Вариантом модификации ходового оборудования может послужить применение пьезогенераторов в подвеске (упругих элементах или амортизаторах) машин на базе автомобильных и специальных шасси [15]. Этому способствует появление адаптивных подвесок с мехатронным компонентом, например DRiV (Digital Ride Control Valve) от фирмы Tenneco Inc (США). Они имеют электронное управление перепускными клапанами и требуют постоянного подвода электропитания от бортовой системы автомобиля [16]. Внедрив в них компактные пьезогенераторы, можно получить полностью автономные системы. Существуют перспективы применения пьезоэлектрических компонентов и в технике, оборудованной торсионной подвеской. Возможность создания преобразователей сложной формы, состоящих из ряда сегментов, соединенных при помощи токопроводящего клея и способных трансформировать энергию кручения вала в электроэнергию (рисунок 2), получила свое развитие в рамках исследовательских работ, проводимых в конце 90-х — начале 2000-х годов [17].

Использование пьезогенераторов в ходовой части машин наиболее эффективно для специализированной техники (строительной, дорожной, военной и т. д.), передвигающейся значительное время по дорогам с плохим покрытием или бездорожью, что приводит к активной работе подвески.

Возможно применение пьезопреобразователей и в силовых установках машин. Среди предлагаемых вариантов — монтаж преобразователей вместе с комплектом усилителей на опорах крепления двигателя к раме или на корпусных деталях, например блоке цилиндров или блок-картере. При этом они будут воспринимать циклические колебания от процессов воспламенения топлива в цилиндрах и внутренних механических движений цилиндропоршневой группы и других деталей. Внедрение данной системы позволит избавиться от традиционного генератора. Тем самым можно повысить как мощность двигателя, так и его экономичность.

Актуальность внедрения пьезопреобразователей на транспорте также заключается в росте объемов выпуска гибридных и полностью электрических транспортных средств и специализированной техники, например строительной (экскаваторы Volvo EX-2, CAT 336E H, Komatsu PC200LC-8 H,

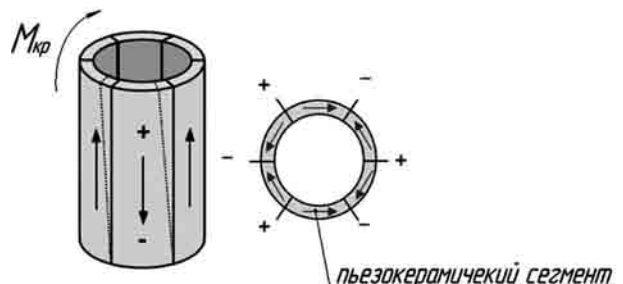


Рисунок 2 — Пьезогенератор для торсионной подвески
Figure 2 — Piezoelectric generator for torsion bar suspension

грузовые автомобили Volvo FL и Volvo FE и др). Вопросы продления непрерывности работы данных машин и подзарядки батарей требуют эффективных решений.

Упомянув дорожно-строительную технику, стоит отметить возможности использования пьезогенераторов в конструкциях рабочих органов, подвергающихся во время проведения рабочих операций значительным знакопеременным циклическим нагрузкам. Так на бульдозерах или автогрейдерях возможна установка их на отвалах, например, между лобовыми листами и задней стенкой коробки (рисунок 3). При этом возникающие при резании и перемещении грунта вибрации и деформации рабочего органа будут приводить к генерации электрической энергии, направляемой в последующем для заряда аккумуляторных батарей или снабжения локальных потребителей (системы освещения, сигнализации и т. д.). В скреперах их можно установить на задних подвижных стенках ковшей. Рекуперативный эффект будет наблюдаться как в процессе загрузки (ввиду воздействия загружаемого грунта на стенку), так и разгрузки (за счет вибраций и деформаций в процессе выталкивания грунта). Широкие возможности для использования пьезогенераторов предоставляют машины, оборудованные рабочими органами для погружения свай (дизель-молоты, вибропогружатели и т. д.), создающие значительные усилия и вибрации в конструкции машины (рисунок 4).

Аэрокосмическая отрасль также может стать серьезным потребителем пьезоэлектрических генераторов. В процессе полета элементы летательных аппаратов испытывают значительные переменные нагрузки различного характера, которые обуславливают соответствующие переменные напряжения, приводящие к появлению изгибных деформаций, вибраций и т. д. Одними из наиболее высоконагруженных элементов конструкции самолета выступают крылья, которые передают

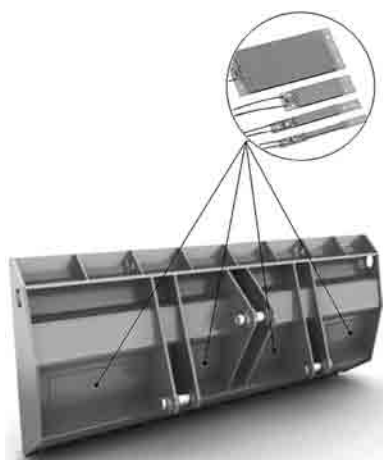


Рисунок 3 — Схема установки изгибных пьезогенераторов на отвале бульдозера
Figure 3 — Installation scheme of bending piezoelectric generators on blade of bulldozer



Рисунок 4 — Схема установки пьезогенераторов на вибропогружателе
Figure 4 — Installation scheme of piezoelectric generators on vibratory driver

подъемную силу на фюзеляж, а также обеспечивают продольную устойчивость и управляемость. Как следствие в них наиболее явно проявляются деформации кручения и изгиба.

Эти деформации, при внедрении пьезогенераторов под обшивку планера, могут принести полезный эффект по выработке электроэнергии, которую можно потратить на обеспечение питания бортового оборудования [18]. Особенно это актуально для таких летательных аппаратов, как беспилотные, повышение автономности и энергоэффективности которых является перспективной областью их совершенствования.

Существуют примеры использования пьезогенераторов в вертолетостроении. Так, фирмой Cedrat Technologies SA (Франция) проведены испытания пьезоактуаторов, встроенных в лопасти вертолета [19], предназначенных для управления сервокрылками несущего винта.

Пьезогенераторы могут найти применение и в оборонной промышленности. Помимо вариантов, отмеченных выше, возможно их использование в оружейных системах — в противооткатных устройствах и устройствах амортизации автоматических пушек, имеющих высокий темп стрельбы и значительную энергию отдачи. Совокупность описанных вариантов рекуперации энергии в сочетании с устройствами накопления (аккумуляторные батареи, суперконденсаторы, ионисторы и т. д.) может стать своеобразной заменой вспомогательных силовых установок, получивших сегодня широкое распространение в бронетехнике и применяемых для выработки электроэнергии во время стоянок без значительных затрат топлива и демаскирующего теплового излучения, связанных с работой основного двигателя.

Заключение. Таким образом, пьезогенераторы имеют все шансы найти свое применение в роли

компонентов автономных рекуперативных систем машин и механизмов, преобразующих механическую нагрузку в электрическую энергию. Появление пьезоэлектрических преобразователей с высокой чувствительностью, надежностью и длительным жизненным циклом открывает значительные возможности для реализации данного направления, представляющего большой научный и практический интерес. Перспективность использования пьезопреобразователей подтверждает рост спроса на них, что, в свою очередь, приводит к появлению все большего количества производителей. На данный момент в мире уже насчитывается более двадцати крупных фирм по производству пьезокерамических датчиков, в том числе и на территории СНГ (ОАО «НИИ «Элпа» (г. Москва, Зеленоград), ООО «НИИФИ» (г. Пенза), НКТЬ «Пьезоприбор» (г. Ростов-на-Дону), ОАО «ВЗРД Монолит» (г. Витебск) и др.). Тем не менее применение их в машиностроении на сегодняшний день ограничено существующими недостатками конструкций самих преобразователей и необходимостью разработки более совершенных технологий по созданию «пакетных» пьезокомпонентов с лучшими выходными характеристиками, способных обеспечивать питание мощных устройств. Кроме того, имеются сложности при реализации систем рекуперации энергии на их базе, связанные с потребностью внедрения эффективных систем управления, передачи и накопления энергии.

Список литературы

1. Довгяло, В.А. Машины и оборудование для содержания автомобильных дорог: учеб. пособие / В.А. Довгяло; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. — Гомель: БелГУТ, 2016. — 288 с.
2. Довгяло, В.А. Автоматизированные системы управления путевыми и дорожно-строительными машинами: учеб. пособие / В.А. Довгяло, Д.И. Бочкарев; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. — Гомель: БелГУТ, 2012. — 202 с.
3. Довгяло, В.А. Дорожно-строительные машины: учеб. пособие: в 2 ч. / В.А. Довгяло, Д.И. Бочкарев; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. — Гомель: БелГУТ, 2010. — Ч. 1. Машины для земляных работ. — 250 с.
4. Довгяло, В.А. Дорожно-строительные машины: учеб. пособие: в 2 ч. / В.А. Довгяло, Д.И. Бочкарев; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. — Гомель: БелГУТ, 2014. — Ч. 2. Машины для устройства дорожных покрытий. — 385 с.
5. Шарапов, В.М. Датчики: справ. пособие / под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. — М.: Техносфера, 2012. — 624 с.
6. Шарапов, В.М. Пьезоэлектрические датчики / В.М. Шарапов, М.П. Мусиенко, Е.В. Шарапова; под ред. В.М. Шарапова. — М.: Техносфера, 2006. — 632 с.
7. Latest cases of new energy systems // JR East Group Sustainability Report 2008. — Tokyo, 2008. — 31 p.
8. A preliminary study on the highway piezoelectric power supply system / Hailu Yang [et al.] // International Journal of Pavement Research and Technology. — Vol. 11, No. 2. — Pp. 168–175.
9. Briscoe, J. Nanostructured Piezoelectric Energy Harvesters / J. Briscoe, S. Dunn. — New York: Springer International Publishing, 2014. — 58 p.
10. Свирская, С.Н. Пьезокерамическое материаловедение: учеб. пособие / С.Н. Свирская. — Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2009. — 82 с.
11. Фрайден, Дж. Современные датчики: справ. / Дж. Фрайден; пер. с англ. Ю.А. Заболотной, под ред. Е.Л. Свинцова. — М.: Техносфера, 2005. — 592 с.
12. Wheel with piezoelectric ring and vehicle having same: pat. US 8247952 B2, МПК H01L 41/08 / Kuo-Cheng Chang (TW), Miao-Li Hsien (TW); правообладатель Fox Semicon Integrated Technology, Inc. — US 13/237,962. — Publ. 23.03.2012. — 6 p.
13. Vehicular mounted piezoelectric generator: pat. US 4504761, МПК H01L 41/08 / Charles G. Triplett (US). — US 335,256. — Publ. 12.03.1985. — 5 p.
14. Pressure off when it comes to checking tyres // Automotive Design Magazine. — 2013. — No 4. — P. 7.
15. Electricity Generation through Piezoelectric Material in Automobile / Arpit Bhatt, Chirag Nagar, Vihan Bhavsar, Yash Shah // SSRG International Journal of Mechanical Engineering. — 2017. — Vol. 4, No. 1. — Pp. 14–17.
16. The six sense for your drive. Monroe intelligent suspension brochure. — Illinois: Tenneco Inc., 2017. — 6 с.
17. Jaehwan, K. Performance test and improvement of piezoelectric torsional actuators / K. Jaehwan, K. Byungwoo // Smart materials and structures. — 2001. — No. 8. — Pp. 750–757.
18. Sosnicki, O. Vibration energy harvesting in aircraft using piezoelectric actuators / O. Sosnicki, N. Lhermet, F. Claeysen // ACTUATOR 2006, 10th International Conference on New Actuators. — Germany, 2006. — Pp. 968–971.
19. Petitniot, J-L. Experimental assessment and further development of amplified piezo actuators for active flap devices / J-L. Petitniot, H-M. des Rochettes, P. Leconte // ACTUATOR 2002, 8th International Conference on New Actuators. — Germany, 2002. — Pp. 296–299.

BOCHKARYOV Dmitry I., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Dean of the Civil Engineering Faculty¹

E-mail: bochk_dmitr@mail.ru

PUPACHOU Dmitry S.

Assistant Lecturer of the Department “Machine parts, track and construction machines”¹

E-mail: dimati1990@tut.by

¹Belarusian State University of Transport, Gomel, Republic of Belarus

MODERN STATE AND PROSPECTS OF USING PIEZOELECTRIC TRANSDUCERS IN MOBILE MACHINE DESIGN

The article describes the current level of piezoelectric transducers development based on ceramics, composite and film materials, their design features, advantages, and disadvantages. On the basis of the noted properties of piezoelectric components, it is proposed to use them in the design of mechanical engineering products as elements of recuperative energy-saving systems.

Keywords: piezoelectric effect, transducer, energy, machine, mechanism, energy efficiency, recuperation

References

1. Dovgalyo V.A. *Mashiny i oborudovanie dlya sodержaniya avtomobilnykh dorog: ucheb. posobie* [Machines and equipment for the maintenance of roads: study guide]. Gomel, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet transporta Publ., 2016. 288 p.
2. Dovgalyo V.A., Bochkaryov D.I. *Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya putevymi i dorozhno-stroitelnyimi mashinami: ucheb. posobie* [Automated control systems for track and road-building machines: study guide]. Gomel, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet transporta Publ., 2012. 202 p.
3. Dovgalyo V.A., Bochkaryov D.I. *Dorozhno-stroitelnye mashiny. V 2 ch. Ch. 1. Mashiny dlya zemlyanykh rabot: ucheb. posobie* [Road building machines. In 2 parts. Pt. 1. Earth moving machines: study guide]. Gomel, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet transporta Publ., 2010. 250 p.
4. Dovgalyo V.A., Bochkaryov D.I. *Dorozhno-stroitelnye mashiny. V 2 ch. Ch. 2. Mashiny dlya ustroystva dorozhnykh pokrytiy: ucheb. posobie* [Road building machines. In 2 parts. Pt. 2. Paving machines: study guide]. Gomel, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet transporta Publ., 2014. 385 p.
5. Sharapov V.M. *Datchiki: sprav. posobie* [Sensors: reference guide]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2012. 624 p.
6. Sharapov V.M., Musienko M.P., Sharapova E.V. *Pezelektricheskie datchiki* [Piezoelectric sensors]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006. 632 p.
7. Latest cases of new energy systems. *JR East Group Sustainability Report 2008*, 2008, p. 31.
8. Hailu Yang, et al. A preliminary study on the highway piezoelectric power supply system. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2018, vol. 11, no. 2, pp. 168–175.
9. Briscoe J., Dunn S. *Nanostructured Piezoelectric Energy Harvesters*. New York, Springer International Publishing, 2014, 58 p.
10. Svirskaya S.N. *Pezeramicheskoe materialovedenie: ucheb. posobie* [Piezoceramic Materials: study guide]. Rostov-na-Donu, Yuzhnyy federalnyy universitet Publ., 2009. 82 p.
11. Fraden J. *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. New York, Springer, 2004. 589 p.
12. Chang K.-Ch., Hsien M.-L. *Wheel with piezoelectric ring and vehicle having same*. Patent USA, no. 8247952 B2, 2012.
13. Triplett C.G. *Vehicular mounted piezoelectric generator*. Patent USA, no. 4504761, 1985.
14. Pressure off when it comes to checking tyres. *Automotive Design Magazine*, 2013, no. 4, p. 7.
15. Bhatt A., Nagar Ch., Bhavsar V., Shah Y. Electricity Generation through Piezoelectric Material in Automobile. *SSRG International Journal of Mechanical Engineering*, 2017, vol. 4, no. 1, pp. 14–17.
16. *The six sense for your drive*. Illinois, Tenneco Inc., 2017. 6 p.
17. Jaehwan K., Byungwoo K. Performance test and improvement of piezoelectric torsional actuators. *Smart materials and structures*, 2001, no. 8, pp. 750–757.
18. Sosnicki O., Lhermet N., Clayysen F. Vibration energy harvesting in aircraft using piezoelectric actuators. *ACTUATOR 2006. Proc. 10th International Conference on New Actuators*. Bremen, 2006, pp. 968–971.
19. Petitniot J.-L., des Rochettes H.-M., Leconte P. Experimental assessment and further development of amplified piezo actuators for active flap devices. *ACTUATOR 2002. Proc. 8th International Conference on New Actuators*. Bremen, 2002, pp. 296–299.