Обзорная статья начинающих ученых
УДК 625.7:620.9
DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_117–122

ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ СБОРА ЭНЕРГИИ С ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

Семён Александрович Петров, Кирилл Константинович Ершов

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия

© Петров С. А., Ершов К. К., 2026

Автор-корреспондент: С. А. Петров, e-mail: urta.1732@mail.ru

АННОТАЦИЯ

В данной статье приведен обзор технологий для преобразования кинетической энергии транспортных средств в электрическую. Рассмотрены пьезоэлектрические, термоэлектрические, электромагнитные, трибоэлектрические генераторы электрической энергии. Сделаны выводы о необходимых для эффективной работы условиях каждого варианта, из них выбраны наиболее перспективные и жизнеспособные.
Проанализированы преимущества и ограничения каждого метода. Показано, что пьезоэлектрические преобразователи обладают наибольшей плотностью энергии и перспективны для интеграции в дорожное полотно. Термоэлектрические генераторы эффективны в жарком климате, но имеют низкий КПД. Электромагнитные системы требуют интенсивного трафика, а трибоэлектрические пока неконкурентоспособны. Сделан вывод о приоритете развития пьезоэлектрических систем на магистралях с высокой нагрузкой. Также отмечены проблемы масштабирования и необходимость дальнейших исследований.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, дорожные покрытия, преобразователи энергии, энергия дорожного полотна, термоэлектрические генераторы, электромагнитные генераторы, трибоэлектрические генераторы, автономные сенсорные сети, энергоэффективность

Для цитирования: Петров С. А., Ершов К. К. Обзор технологий сбора энергии с дорожных покрытий // Технология и энергетика. 2026. № 3 (3). С. 117–122. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_117–122.

A REVIEW OF TECHNOLOGIES FOR HARVESTING ENERGY FROM ROAD PAVEMENTS

Semyon Alexandrovich Petrov, Kirill Konstantinovich Ershov

Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint Petersburg, Russia

Corresponding author: S. A. Petrov, e-mail: urta. 1732@mail. ru

ABSTRACT

The present paper reviews technologies for converting vehicle kinetic energy into electricity. Piezoelectric, thermoelectric, electromagnetic, and triboelectric electrical energy generators are considered. The study draws conclusions about the conditions necessary for the effective operation of each variant, selecting the most promising and viable among them. The paper analyzes the advantages and limitations of each method. Piezoelectric transducers are shown to have the highest energy density and to be promising for road pavement integration. Thermoelectric generators are effective in hot climates but have low efficiency. Electromagnetic systems require high traffic intensity, whereas triboelectric systems are not yet competitive. It is concluded that the development of piezoelectric systems on high-traffic highways is a priority. Scaling problems and the need for further research are also noted.

Keywords: renewable energy sources, road pavements, energy converters, road pavement energy, thermoelectric generators, electromagnetic generators, triboelectric generators, autonomous sensor networks, energy efficiency

For citation: Petrov S. A., Ershov K. K. (2026) 'A review of technologies for harvesting energy from road pavements'. Technology and Energy, no. 3 (3), pp. 117–122. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_117–122.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одной из задач, которые ставит перед собой человечество, является поиск возобновляемых источников энергии. Это обусловлено множеством причин: исчерпаемость ископаемых видов топлива, экологические проблемы, стремление к обеспечению энергетической независимости своей страны. Именно поэтому люди стараются развивать технологии, способные вырабатывать энергию из возобновляемых источников. Примером такого рода источника энергии может послужить дорожное полотно, которое постоянно претерпевает разнообразные воздействия, таких как солнечный свет и движение транспортных средств.

В данной статье рассмотрены технологии сбора энергии с дорожного покрытия с помощью пьезоэлектрических, термоэлектрических, электромагнитных и трибоэлектрических преобразователей. На рисунке 1 представлена схема сбора механической и тепловой энергии с дорожного полотна.

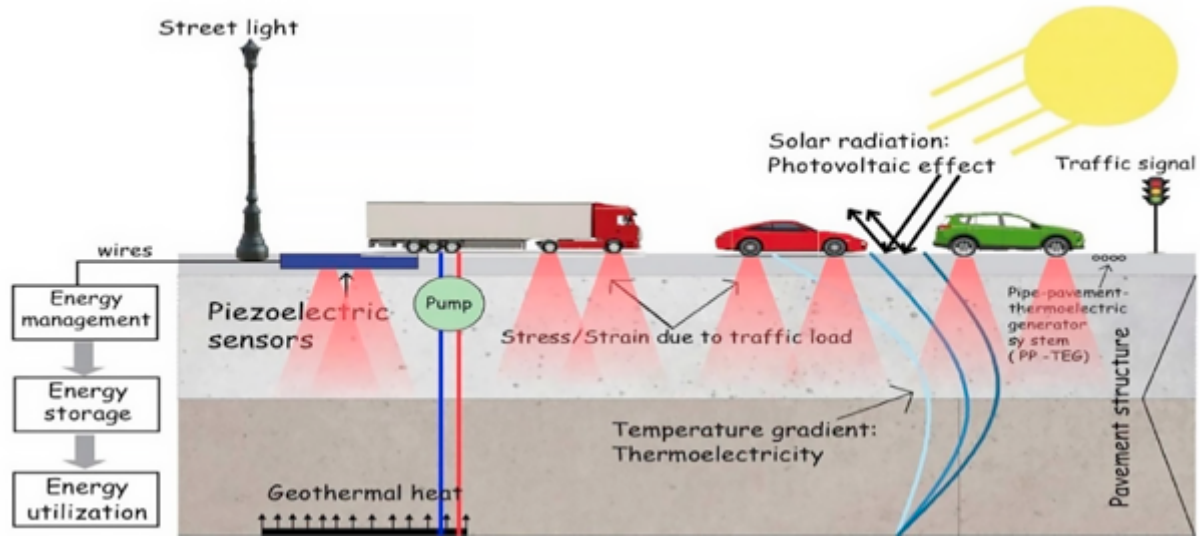


Рисунок 1. Схема сбора механической и тепловой энергии с дорожного покрытия

Figure 1. Schematic representation of mechanical and thermal energy harvesting from road pavement

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Пьезоэлектрические преобразователи являются одной из наиболее развивающихся технологий для сбора энергии с дорожного покрытия. Их принцип действия основан на прямом пьезоэлектрическом эффекте — явлении, при котором деформация пьезоэлемента приводит к возникновению связанных зарядов на поверхностях деформированного твёрдого тела. Благодаря этому явлению механическая энергия транспортных средств может быть преобразована в электрическую независимо от погодных условий [1]. Ввиду увеличения грузоперевозок и интенсивности движения транспорта, особенно большегрузного, пьезоэлектрические генераторы становятся все более перспективной технологией для сбора энергии от вибраций дорожного полотна [1].

Пьезоэлектрические преобразователи, интегрированные в дорожное покрытие, генерируют электроэнергию посредством деформаций, вызванных транспортными средствами, преобразуя кинетическую энергию и механические напряжения в электричество. На рисунке 2 представлена схема одного из способов реализации пьезоэлектрического генератора. Полученная энергия может использоваться для питания беспроводных сенсорных сетей и мониторинга состояния дорожной инфраструктуры [2]. Характеристики таких систем зависят от конструкции преобразователей и условий движения. Например, система Waynergy (создана португальской компанией Waydip при сотрудничестве лаборатории механики дорожного покрытия Университета Коимбры) в часы пик генерирует 525 Дж/ч (0,15 Вт·ч), а устройство размером 150×150 мм при интенсивном движении (0,7 МПа, 15 Гц) вырабатывает 50,41 мВт при оптимальной нагрузке 4 кОм [2]. Лабораторные испытания показывают, что плотность энергии у таких систем одна из самых высоких, она уступает только фотоэлектрическим преобразователям [2].

Эффективность пьезоэлектрических устройств зависит от различных факторов, включая режим

механического-электрического преобразования. Наиболее часто используются режимы сжатия перпендикулярно направлению поляризации пьезоэлемента и сжатие вдоль направления поляризации. Второй режим обладает более высоким пьезоэлектрическим коэффициентом и больше соответствует условиям дорожного движения, обеспечивая большее энергопроизводство [5]. Мощность системы зависит от характеристик пьезоэлементов, схемы их соединения (последовательная или параллельная), частоты, сопротивления и прикладываемой нагрузки [5]. Моделирование показывает, что оптимизация материалов и параметров цепи значительно повышает эффективность выходной мощности в различных дорожных и нагрузочных сценариях [2].

При использовании пьезоэлектрических преобразователей на дорогах, где они могут подвергаться миллионам циклов напряжений, одним из важнейших вопросов становится их долговечность. Для защиты от механических напряжений и увеличения срока службы применяются методы инкапсуляции в бетонные блоки, а также в слои строительного раствора [2]. Испытания показывают, что новые конструкции генераторов сохраняют 97,4 % своего напряжения после 500 000 циклов напряжений, подтверждая их устойчивость к длительным нагрузкам [2]. Оптимизированные конструкции демонстрируют превосходство в мощности и стабильности напряжения после сотен тысяч циклов, не повреждая при этом дорожное покрытие [2].

Изначально пьезоэлектрические преобразователи на основе цирконата-титаната свинца (PZT) не были предназначены для асфальтобетонных покрытий. Регулярные нагрузки в совокупности с конструкцией, не рассчитанной на работу в таких условиях, быстро выводили их из строя [3]. Поэтому некоторые компании, например Innowattech (Израиль) и Genziko (США), представили коммерческие продукты для сбора энергии, но данные по энергогенерации (5,76 Дж и 40 Дж на модуль за проход автомобиля соответственно) требуют валидации в реальных условиях [3]. Современные исследования направлены на разработку гибких, лёгких и биосовместимых полимерных наногенераторов, а также экологически безопасных бессвинцовых материалов [1].

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Термоэлектрические генераторы (ТЭГ) представляют собой перспективную технологию для сбора тепловой энергии, аккумулированной дорожными покрытиями, с последующим преобразованием её в электричество. Их принцип работы основан на эффекте Зеебека — явлении возникновения электродвижущей силы (термоэдс) в замкнутой цепи из последовательно

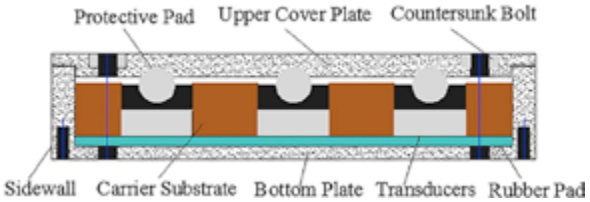


Рисунок 2. Схема пьезоэлектрического преобразователя
Figure 2. Schematic of a piezoelectric transducer

соединенных разнородных металлов, контакты между которых поддерживаются при разных температурах [1, 3]. На рисунке 3 изображен один из вариантов реализации термоэлектрического генератора. Для эффективного преобразования тепла от дорожного покрытия в электричество требуются материалы, сочетающие в себе высокий коэффициент Зеебека, высокую электропроводность и низкую теплопроводность [1]. Основными термоэлектрическими материалами являются полупроводники на основе теллурида висмута (Bi_2Te_3), теллурида свинца (PbTe) и кремний-германия (SiGe) [2, 5]. ТЭГ представляют собой твердотельные устройства, не имеющие движущихся частей, что обеспечивает их долговечность, низкие эксплуатационные расходы и высокую надёжность [2].

Дорожное полотно нагревается под воздействием солнечной радиации и интенсивного потока транспорта до более чем 60 °C, из-за чего возникает температурный градиент между поверхностью и более холодными нижними слоями грунта [2]. Конструктивно системы термоэлектрического сбора энергии включают несколько ключевых элементов: теплосборник, размещённый в дорожном полотне, сам ТЭГ и систему охлаждения для холодной стороны.

Существует множество конструктивных решений теплосборников. К ним относятся:

- Системы с теплообменниками в виде труб, где в качестве теплоносителя используется вода, нагретая солнцем [3, 4].
- Конструкции со стержневыми (алюминиевый стержень) или пластинчатыми (Z-образная медная пластина, H-образная алюминиевая пластина) теплосборниками, которые непосредственно контактируют с асфальтом для забора тепла [4].
- Многослойные алюминиевые пластины, которые частично заглублены в асфальт, а частично — в грунт, что позволяет увеличить площадь установки ТЭГ без увеличения занимаемой площади и обеспечивает эффективный теплосъем [4].

Для отвода тепла с холодной стороны применяются пассивные методы (алюминиевые радиаторы-рёбра) или

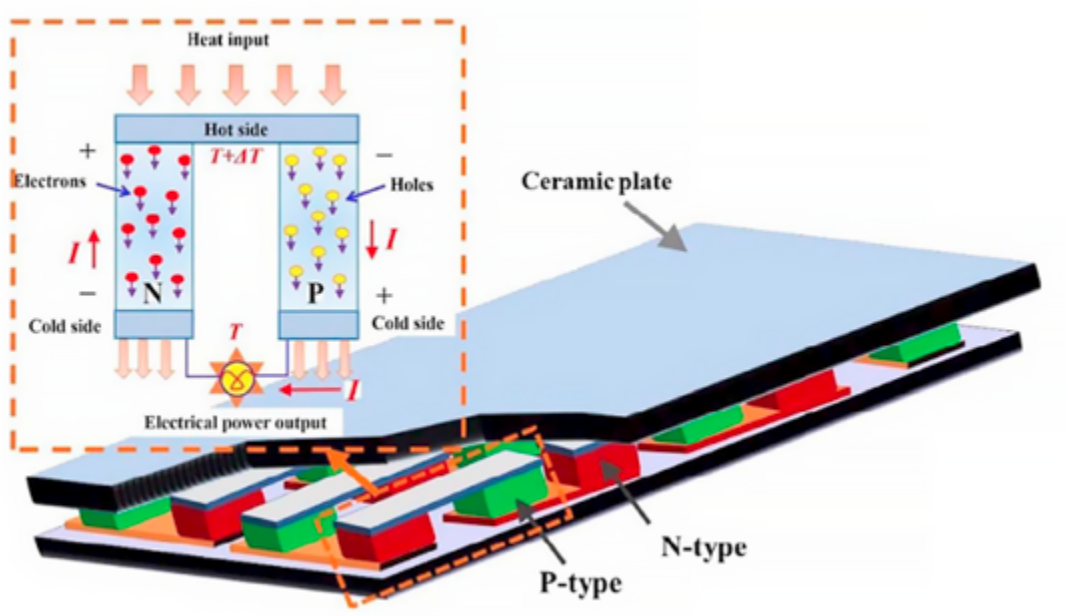


Рисунок 3. Схема термоэлектрического преобразователя
Figure 3. Schematic of a thermoelectric converter

активные системы, использующие воду из близлежащих водоёмов, резервуары с водой или фазопереходные материалы — вещества, способные накапливать и высвобождать тепловую энергии при изменении агрегатного состояния [3, 4].

Одним из преимуществ ТЭГ является их способность смягчать эффект городского теплового острова за счёт преобразования тепловой энергии, которая может быть избыточна в больших населённых пунктах [5]. Технология экологически безопасна, не производит углекислый газ и подходит для питания автономных устройств, вроде датчиков мониторинга состояния дорог, систем связи и уличных фонарей [2, 5]. Полевые испытания показывают следующее: система способна генерировать напряжение 0.4–0.7 В, заряжать суперконденсаторы для питания светильников [2, 5].

Главным ограничением технологии остаётся низкий коэффициент полезного действия (КПД) преобразования тепла в электричество, который в различных исследованиях составляет от 1.6 % до 4 % [3]. Выходная мощность напрямую зависит от величины температурного градиента: лабораторные прототипы показывают мощность от десятков микроватт до нескольких ватт, при этом увеличение температурного градиента значительно повышает выходную мощность [2, 3]. Другими проблемами являются: сложность и стоимость некоторых конструкций, необходимость технического обслуживания (например, риск протечек в гидравлических системах), а также риск нарушения целостности дорожного полотна [4]. Несмотря на наличие коммерческих ТЭГ, готовых решений для масштабного внедрения в дорожные покрытия на рынке пока нет [3].

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Электромагнитные генераторы работают на основе закона Фарадея, согласно которому при движении проводника в магнитном поле возникает ЭДС электромагнитной индукции. Обычно такие генераторы использовались на крупных электростанциях, но за последние годы разработаны компактные модели, способные преобразовывать энергию механических вибраций в электрическую. Эти системы могут функционировать двумя способами: путём колебания магнита внутри корпуса с катушкой или перемещения магнитного источника относительно катушки. Второй метод считается более стабильным и эффективным, так как в нем меньше изнашивающихся деталей и проще обеспечить надёжное соединение [1].

Ключевой особенностью электромагнитных генераторов является то, что наиболее часто они активируются не самой механической энергией транспортных средств. Для этого используются различные приспособления, такие как гидравлические, пневматические, электромеханические системы или MEMS (микроэлектромеханические системы) [3]. На практике такие устройства часто устанавливаются за лежачими полицейскими, как

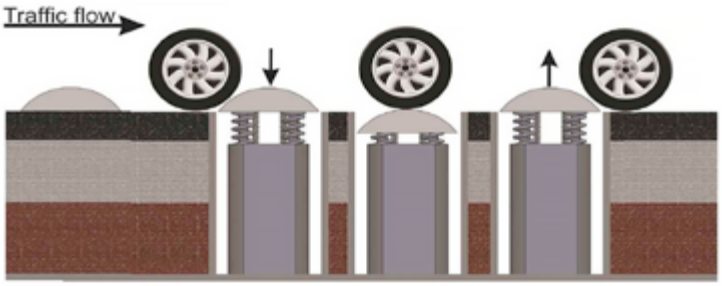


Рисунок 4. Схема работы электромагнитного преобразователя, располагаемого за лежачим полицейским
Figure 4. Schematic of an electromagnetic converter positioned behind a speed bump

это показано на рисунке 4, где нагрузка на дорожное полотно активирует механизм, перемещающий магнит внутри поля катушки [1].

Электромагнитные генераторы обычно размещаются в зонах с интенсивным движением, таких как пункты взимания платы или искусственные неровностей. Генерируемая энергия может использоваться для питания локальной инфраструктуры или накапливаться. Эта технология проста и не требует внешнего питания, однако её эффективность зависит от плотности транспортного потока, что ограничивает её применение в районах с низкой загруженностью [5].

Электромагнитные генераторы, в сравнении с другими преобразователями, не могут конкурировать в размерах и сложности установки рабочей системы. Тем не менее они остаются актуальным благодаря своей надёжности, простоте и эффективности в условиях стабильного и интенсивного трафика.

ТРИБОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Трибоэлектрические генераторы (TBG) работают на основе явления возникновения электрического заряда при трении двух разнородных материалов, которые приобретают в ходе процесса положительный или отрицательный заряд. Знак заряда зависит от свойств материала и положения в трибоэлектрическом ряду (положительный заряд приобретают материалы с большей диэлектрической проницаемостью по правилу Коэна). Когда поверхности контактируют и разделяются, создаётся разность потенциалов, которая приводит к движению электронов и возникновению ЭДС.

В контексте дорожных покрытий идея заключается в интеграции TBG в структуру асфальта или специальных секций, которые взаимодействуют с колёсами транспорта. При движении транспорта трение между шинами и покрытием генерирует электрический заряд, который можно преобразовать в полезную энергию.

В трибоэлектрических преобразователях могут использоваться широко распространённые материалы, вроде воды и кремния. Они имеют несложную конструкцию и относительную дешевизну, а также подходят для интеграции в уже существующие инфраструктуры. Но существует множество трудностей, связанных с вопросами долговечности и износа, низкой эффективности в сравнении с другими технологиями. К тому же возникают сложности с масштабированием, из-за чего реализация подобных проектов задерживается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После обзора и сравнения рассмотренных технологий можно сделать вывод о том, что наиболее перспективными и жизнеспособными для внедрения в дорожные покрытия являются пьезоэлектрические преобразователи, благодаря высокой плотности генерируемой энергии, прогрессу в процессе повышения долговечности и возможности прямой интеграции в полотно для питания автономной инфраструктуры. Термоэлектрические генераторы имеют перспективы в жарком климате, но ограничены низким КПД, а электромагнитные системы эффективны лишь в точках с гарантированной высокой нагрузкой. Трибоэлектрические технологии пока неконкурентоспособны из-за проблем с износом и масштабированием. Таким образом, приоритет в развитии следует отдать пьезоэлектрическим системам, особенно на магистралях с интенсивным движением.

Список литературы / References

1. Duarte F. and Ferreira A. (2016) 'Energy harvesting on road pavements: state of the art', *Energy*, 169 (EN2), pp. 79–90.
2. Warsi M. H. and Kumar T. N. (2024) 'Advances in energy harnessing techniques for smart highways: a review', *Electrical Engineering*, article 10663896408. DOI: 10.1007/s00202-024-02379-8.

3. Zabihi N. and Saafi M. (2020) 'Recent developments in the energy harvesting systems from road infrastructures', *Sustainability*, 12 (16), article 6738. DOI: 10.3390/su12176738.
4. Wang C. H., Zhao J. X., Li Q. and Li Y. W. (2018) 'Optimization design and experimental investigation of piezoelectric energy harvesting devices for pavement', *Applied Energy*, 229, pp. 18–30. DOI: 10.1016/j. apenergy. 2018.07.036.
5. Chen S., Wei L., Huang C. and Qin Y. (2025) 'A review on the technologies and efficiency of harvesting energy from pavements', *Energies*, 18 (15), article 3959. DOI: 10.3390/en18153959.

Информация об авторах

Петров Семён Александрович, *студент, кафедра автоматизированного электропривода и электротехники, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; e-mail: urta. 1732@mail.ru*

Ершов Кирилл Константинович, *старший преподаватель, кафедра автоматизированного электропривода и электротехники Высшей школы технологии и энергетики, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; SPIN-код: 1149–6092; e-mail: volt. 96@yandex.ru.*

Information about the authors

Petrov Semyon Aleksandrovich, *student, Department of Automated Electric Drives and Electrical Engineering, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivana Chernykh St., Saint Petersburg, 198095, Russia; e-mail: urta. 1732@mail.ru.*

Ershov Kirill Konstantinovich, *Senior Lecturer, Department of Automated Electric Drives and Electrical Engineering, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivana Chernykh St., Saint Petersburg, 198095, Russia; SPIN-code: 1149–6092; e-mail: volt. 96@yandex.ru.*