

3. Использование компьютерных технологий для контроля знаний студентов при выполнении физического практикума в рамках работы совместного факультета ТИПСЭАД-БНТУ / Н. П. Юркевич, Г. К. Савчук, А. П. Ахмедов [и др.] // ВОДА. ГАЗ. ТЕПЛО 2020: материалы Междун. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию Белор. нац. техн. ун-та, 100-лет. каф. «Гидротехнич. и энергетич. строит., водный транспорт и гидравлика», 90-лет. каф. «Теплогазоснабжение и вентиляция», Минск, 8–10 окт. 2020 г. / Белорус. нац. технический. ун-т ; редкол. С. В. Харитончик [и др.]. – Минск, 2020. – С. 324–328.

4. Ахмедов, А. П. Совмещение реальных и виртуальных лабораторных работ в образовательном процессе студентов / А. П. Ахмедов, С. Б. Худойберганов, Н. П. Юркевич // Актуальные проблемы современного естествознания: материалы XI Республиканского научно-методологического семинара, Минск, 3 декабря 2020 г. / Респ. ин-т высшей школы. – Минск, 2020. – С. 91–95.

5. Yurkevich, N. P. Determination of micro deformations and coherent scattering regions in ceramic materials / N. P. Yurkevich, G. K. Sauchuk // Sciences of Europe. – 2022. – Vol. 1, № 86. – P. 59–66.

6. Изучение в физическом лабораторном практикуме методов определения продуктов распада в ядерных реакциях / Н. П. Юркевич, Г. К. Савчук, А. П. Ахмедов [и др.] // Вышэйшая школа. – 2024. – № 4. – С. 10–13.

7. Юркевич, Н. П. Исследование распределения магнитного поля в многослойном соленоиде конечной длины / Н. П. Юркевич, Г. К. Савчук, П. Г. Кужир // Физическое образование в вузах. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 49–60.

УДК 629.113.65

Оптимизация накопления и использования электрической энергии от пьезоэлектрических элементов в дорожных покрытиях с применением интеллектуальных систем управления

Ахмедов А. П.¹, Худойберганов С. Б.¹, Юркевич Н. П.²

¹Ташкентский государственный транспортный университет
Ташкент, Республика Узбекистан,

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

В статье предлагается инновационный подход к повышению эффективности накопления электрической энергии, генерируемой за счет пьезоэлектрического эффекта в дорожных покрытиях при механической деформации от движения транспортных средств. Рассматривается интеграция

интеллектуальных систем управления для оптимизации работы накопительных систем, включающих суперконденсаторы и аккумуляторные батареи. Предложены методы адаптивного регулирования параметров накопления заряда в зависимости от интенсивности транспортного потока, типа и массы автомобилей. Особое внимание уделено анализу экономической целесообразности и экологического воздействия технологии. На основе математического моделирования и экспериментальных данных демонстрируется возможность увеличения энергоэффективности системы на 15–20 % по сравнению с традиционными подходами. Результаты исследования могут быть использованы для создания энергоэффективных решений в области умной инфраструктуры автомобильных дорог.

У некоторых материалов наблюдается эффект электрической поляризации, изменяющейся при любой механической деформации материала. Этот эффект наблюдается у материалов, в кристаллической решетке которых отсутствует центр симметрии, например, у кварца. Любая внешняя механическая деформация вызывает изменение дипольного момента кристалла, что является причиной макроскопической электрической поляризации, приводящей в результате к возникновению разности зарядов на гранях кристалла. Этот эффект может также наблюдаться в материалах, обладающих центром симметрии, если только симметрия нарушена сильным электрическим полем из-за спонтанной поляризации материала [1–3]. Примером такого класса материалов (ферроэлектриков) является титанат бария. Пьезоэлектрики являются обратимыми электромеханическими преобразователями, т. е. способны преобразовывать механическую энергию в электрическую и, наоборот, электрическую энергию в механическую. Во время движения автомобиля по автомобильной дороге он оказывает некоторое давление на дорожное покрытие.

В результате этого происходит поперечная деформация дорожного покрытия. Если некоторый отрезок дорожного покрытия изготовлен из материала, обладающего пьезоэлектрическим свойством, то на обоих краях дорожного покрытия появляются сгусток положительных и отрицательных зарядов. Накопления этих зарядов можно осуществить специальной накопительной системой. Накопившиеся заряды можно использовать в различных целях, например:

- для освещения автомобильных дорог;
- для зарядки аккумуляторных батарей;
- для освещения зданий и витрин находящиеся возле дорог.

Специальная накопительная система состоит из конденсаторов и аккумуляторной батареи. В последние годы в развитии конденсаторов произошел гигантский скачок. Появились двухслойные электрохимические

конденсаторы (Electrochemical Double Layer Capacitors, сокращенно EDLC). В печати также используют термины суперконденсатор (supercap) или ультраконденсатор (ultracap) (рис. 1, *а*). Запасаемая энергия в среднем в 300 раз больше, чем у традиционных конденсаторов тех же габаритов. Напряжение пробоя суперконденсаторов не превосходит нескольких вольт, поэтому для получения нужных рабочих напряжений используется последовательное соединение отдельных конденсаторов.

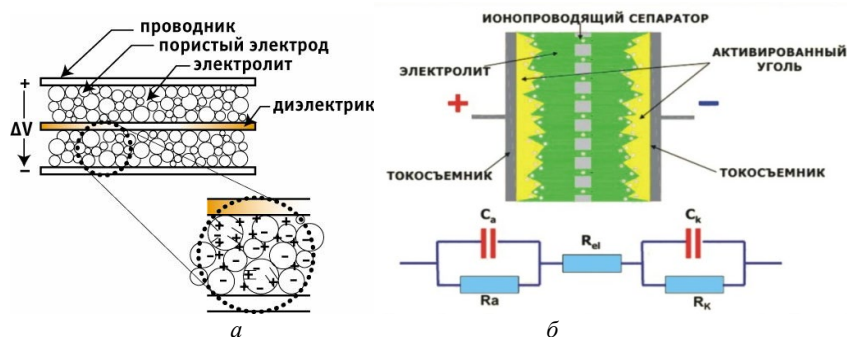


Рис. 1. Суперконденсатор:
а – устройство; *б* – двойной электрический слой

Суперконденсаторы в отличие от обычных конденсаторов обладают намного лучшими электрическими характеристиками [4–8].

Более совершенным является недавно созданный суперконденсатор с двойным электрическим слоем (рис.1, *б*).

Специальная накопительная система в основном состоит из специального приспособления для сборки электрического заряда, набора суперконденсаторов и аккумуляторной батареи.

Предположим, что специальное приспособление для сборки электрического заряда установлено на одном определенном месте этого отрезка (рис. 2, *а*).

На рис. 2, *б* представлено приспособление для сборки электрического заряда в дорожном полотне.

Зависимость напряжения на обкладках суперконденсатора от времени выражается следующим образом:

$$U = \left(\frac{P_a}{P_m} \right) U_0 e^{-\frac{t}{\tau_0 C}}, \quad (1)$$

где U – мгновенное значение напряжения на обкладках суперконденсатора; U_0 – максимальное значение напряжения на обкладках суперконденсатора; P_a – вес ненагруженного автомобиля; P_m – вес максимально нагруженного автомобиля; r_0 – внутреннее сопротивление суперконденсатора, обычно $r_0 = 0,01$ Ом; C – емкость суперконденсатора, $C = 100\text{--}300$ Ф.

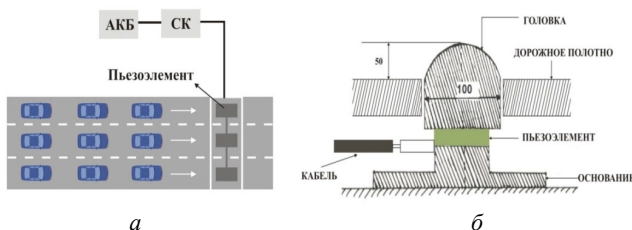


Рис. 2. Схема участка дороги:
 a – полотно дороги с пьезоэлементами; b – приспособление для сборки электрического заряда

Тогда постоянная времени $\tau_0 = r_0 C$ находится в пределах $\tau_0 = (1\text{--}3)C$, что является приемлимым для процесса движения автомобилей по дороге в городских условиях.

Для обычного конденсатора постоянная времени $\tau_0 = r_0 C$ находится в пределах $\tau_0 = (1\text{--}3)10^{-5}C$. Из-за высоких значений постоянного времени суперконденсатора достигается значительное улучшение степени накопления заряда по сравнению с обычными конденсаторами.

Известно, что в городских условиях Ташкента перевозка пассажиров осуществляется в основном автобусами марки Мерседес-Бенс. На примере движения автобусов Мерседес-Бенс на определенном отрезке дороги города можно примерно оценить относительное значение заряда, накопленного на суперконденсаторе и напряжения на его обкладках.

Опытным путем определено, что через специальное приспособление для сборки электрического заряда проходит в дневное время в среднем один автобус за 4 с [9–11].

Введем обозначение $U/U_0 = K_u$ и $P_a/P_m = K_p$. Тогда формула (1) примет вид:

$$K_U = K_p e^{-t/r_0 C}. \quad (2)$$

Построим зависимости $K_U = f(t)$ при определенном значении коэффициента веса автомобиля $K_p = 1$.

Из графика на рис. 3. видно, что через условное время (равное 4 с) напряжение на обкладках суперконденсатора не доходит до нулевого значения и степень накопления заряда возрастает по мере прохождения времени.

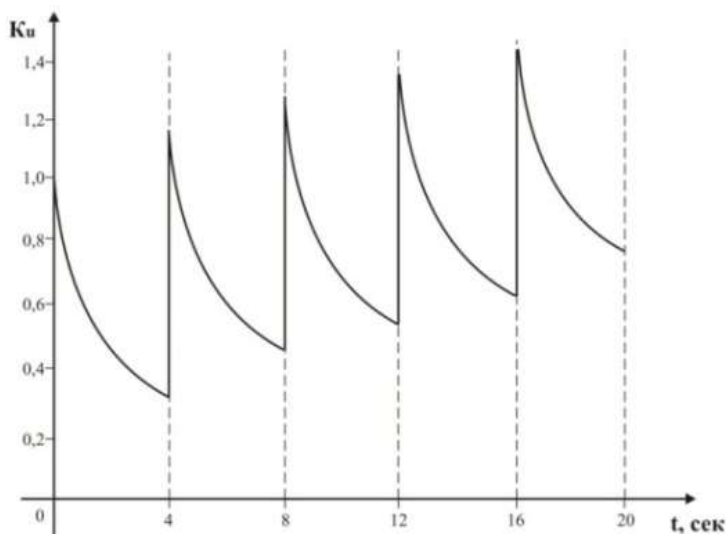


Рис. 3. Зависимость коэффициента накопления напряжения от времени

Следует учесть, что через полосы дорожного полотна проходят автомобили различной модификации и нагруженности. Кроме того, необходимо учитывать количество поперечного ряда дорожного полотна, что может существенно влиять на количестве накопленного заряда на суперконденсаторе. Поэтому в формуле (1) необходимо сделать следующее изменение:

$$U = U_0 e^{-t/r_0 C} \sum_{k=1}^n \left(\frac{P_{ak}}{P_{mk}} \right) \quad (3)$$

Произведем количественную оценку заряда и напряжения, накопленного на суперконденсаторе.

Положим, что к граням кварцевой пластинки, перпендикулярным к оси X , приложено механическое напряжение $F_{\text{мех}} = 1055 \text{ Н/м}^2$. Тогда, получаем следующую напряженность электрического поля $|E| = 5900 \text{ В/м} = 59 \text{ В/см}$. При толщине пластинки, скажем, $d = 0,5 \text{ см}$ напряжение между обкладками будет равно $U = Ed \sim 30 \text{ В}$.

Масса ненегруженного автобуса примерно 8000 кг, масса полностью нагруженного автобуса примерно 12000 кг.

Сила тяжести, действующая на переднюю часть автобуса составляет 50 % от максимальной силы тяжести.

На каждое колесо нагруженного полностью автобуса марки Мерседес-Бенс прилагается механическое напряжение $F_{\text{мех}} = 75000 \text{ Н/м}^2$.

Тогда, получаем следующую напряженность электрического поля $|E| = 419000 \text{ В/м} = 4190 \text{ В/см}$. При толщине пластинки $d = 0,5 \text{ см}$ напряжение между обкладками будет равно $U = Ed \sim 2095 \text{ В}$. Так как передние и задние колеса автобуса прилагают механическое напряжение на пьезоэлемент одновременно, то значение суммарного напряжения удвоится, то есть $U_{\text{вых}} = 2Ed \sim 4190 \text{ В}$. Однако из экономических соображений следует выбрать толщину пластинки, $d = 0,1 \text{ см}$, и тогда напряжение между обкладками будет равно $U = Ed \sim 420 \text{ В}$.

Это приспособление необходимо устанавливать через определенный промежуток расстояния в дорожном полотне автомобильной дороги. Если вместо суперконденсатора используются обычный конденсатор с емкостью $C = 3000 \text{ мкФ}$ и внутренним сопротивлением $r = 0,01 \text{ Ом}$, то относительное накопление напряжения существенно уменьшится. Расчеты показывают, что при использовании суперконденсатора в накопительной системе относительное значение накопленного напряжения превосходит примерно в 10^4 раз относительного напряжения при использовании обычного конденсатора за 12 секунд времени сначала отсчета времени.

Это показывает эффективность использования энергии деформации автомобильных дорог с помощью суперконденсаторов.

Разработанный подход к оптимизации накопления электрической энергии с использованием пьезоэлектрических элементов и интеллектуальных систем управления открывает новые перспективы для создания устойчивой и энергоэффективной инфраструктуры автомобильных дорог. Интеграция адаптивных алгоритмов управления позволяет значительно повысить эффективность накопительных систем, обеспечивая стабильное накопление и использование энергии даже при переменных условиях транспортного потока. Экономический анализ подтверждает целесообразность внедрения предложенной технологии в городских условиях, где высокая интенсивность движения способствует максимальной генерации энергии. Экологический эффект от применения технологии выражается в снижении зависимости от традиционных источников энергии и уменьшении углеродного следа. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку масштабируемых прототипов и их тестирование в реальных условиях эксплуатации, а также на изучение долговечности пьезоэлектрических материалов в составе дорожных покрытий, качественной подготовки специалистов в данной области [12; 13].

Литература

1. Денщиков, К. К. Предельные значения удельной мощности суперконденсаторов / К. К. Денщиков // ОИВТ РАН. – 2011. – С. 348–351.
2. Основные характеристики суперконденсаторов / К. К. Денщиков, А. З. Жук, А. Ф. Герасимов [и др.] // Известия РАН. Серия : Энергетика. – 2011. – № 5. – С.125–131.
3. Способ получения электроэнергии от ветра проезжающих транспортных средств / А. П. Ахмедов, С. Б. Худойбергганов, О. М. Кутбидинов, [и др.] // Universum: технические науки. – 2022. – № 11-3 (104). – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/14603> (дата обращения: 11.04.2025).
4. Ahmedov, A. P. The method of obtaining electrical energy from the wind in the windy areas of the republic of Uzbekistan / A. P. Akhmedov, S. B. Khudoyberganov // International Journal of Advanced Research in Education, Technology and Management. – 2023. – V.2, № 4. – P. 208–217.
5. Определения спелости и сбор урожая дыни с помощью роботов с искусственным интеллектом / А. П. Ахмедов, С. Б. Худойбергганов, У. Н. Бердияров [и др.] // Technical science research in Uzbekistan. – 2024. – № 2(2). – С. 52–57.
6. Abduraxmon, A. P. Cumulative generation of electricity from the wind of passing vehicles and natural wind in the Bukhara region of the Republic of Uzbekistan / A. P. Akhmedov, S. B. Khudoyberganov // E3S Web Conf. – 2023. – Vol. 461. – P. 01073. – URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2023/98/e3sconf_rses23_01073/e3sconf_rses23_01073.html (дата обращения: 12.03.2025).
7. The influence of production conditions on the electrophysical parameters of piezoceramics for different applications / A. P. Akhmedov, G. K. Sauchuk, N. P. Yurkevich [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 264. – P. 04020. – URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2021/40/e3sconf_conmechhydro2021_04020/e3sconf_conmechhydro2021_04020.html (дата обращения 15.05.2025).
8. Akhmedov, A. P. Innovative public transport stop with autonomous power supply / A. P. Akhmedov, S. B. Khudoyberganov, N. P. Yurkevich // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте : материалы Республиканской научно-технической конф., Минск, 20–21 мая 2021 г. / Белорусский национальный технический университет [и др.] ; редкол.: С. В. Харитончик [и др.]. – Минск, 2021. – С. 181–184.
9. Ахмедов, А. П. Ионизатор воздуха для автомобилей / А. П. Ахмедов, С. Б. Худойбергганов // Точная наука. – 2018. – № 24. – С. 10–12.
10. Akhmedov, A. P. Method for wireless transmission of electric power for supplying electric car / A. P. Akhmedov, S. B. Khudoyberganov, U. N. Berdiyoyrov // Galaxy International Interdisciplinary Research Journal. – 2022. – Vol. 10, № 1. – P. 109–113.

11. Digital technologies in the educational space / N. P. Yurkevich, G. K. Sauchuk, A. P. Akhmedov [и др.] // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте : материалы II Республиканской научно-технической конференции, 28–29 апреля 2022 г. / Белорус. национальный технический ун-т [и др.]; редкол.: С. В. Харитончик [и др.]. – Минск, 2022. – С. 389–393.

12. Studying the magnetic field of a multilayer solenoid in the laboratory physics workshop / N. P. Yurkevich, G. K. Sauchuk, A. P. Akhmedov [и др.] // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте : материалы республиканской научно-технической конференции, 20–21 мая 2021 г. / редкол. : С. В. Харитончик [и др.]. – Минск, 2021. – С. 176–180.

13. Akhmedov, A. P. Using solar panels to recharge car battery / A. P. Akhmedov, S. B. Khudoyberganov, N. P. Yurkevich // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте : материалы II Республиканской научно-технической конференции, 28–29 апреля 2022 г. / Белорус. национальный технический ун-т [и др.]; редкол. : С. В. Харитончик [и др.]. – Минск, 2022. – С. 433–437.

УДК 620.130

Определение свойств объектов с использованием магнитных носителей

Павлюченко В. В., Зыков Г. Л., Дорошевич Е. С.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Представлены зависимости $U(t)$ электрического напряжения датчика от времени, соответствующие остаточным распределениям намагниченности сплошных и дискретных магнитных носителей (МН) при воздействии на них с металлическим объектом магнитными полями приставных намагничивающих устройств в виде электромагнитов и постоянных магнитов. Построены зависимости $U(t)$, соответствующие распределениям по координате x , позволяющие повысить точность определения структурных и магнитных свойств объекта за счет учета взаимного влияния МН друг на друга.

Известны многочисленные работы использования магнитного носителя (МН) для контроля дефектов сплошности в разных металлических объектах. Так, в [1; 2] произведен расчет распределений остаточных магнитных полей