

АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ В ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИНАХ

В.И. Посметьев¹, В.О. Никонов², М.А. Савинков³
^{1,2,3} Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова,
г. Воронеж, Россия,
²8888nike8888@mail.ru

Аннотация. В статье обоснована актуальность разработки систем рекуперации энергии в условиях истощения ископаемых ресурсов и ужесточения экологических требований к транспортно-технологическим машинам. Рассмотрены перспективные технологии рекуперации кинетической, тепловой, потенциальной энергии и вибраций, а также проанализированы данные об их эффективности. Установлена прямая зависимость эффективности систем рекуперации от типа машины и ее рабочих режимов, а также доказана высокая результативность гибридных решений. Выявлено, что ключевыми направлениями для дальнейших исследований являются разработка интеллектуальных систем управления, создание новых материалов и комплексная интеграция рекуперативных систем в конструкцию машин.

Ключевые слова: рекуперация энергии, транспортно-технологические машины, энергоэффективность, гибридные системы, кинетические системы, тепловые системы, расход топлива.

ANALYSIS OF THE POTENTIAL OPPORTUNITIES FOR THE USE OF ENERGY RECOVERY SYSTEMS IN TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL VEHICLES

V.I. Posmetev¹, V.O. Nikonov², M.A. Savinkov³
^{1,2,3} Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia,
²8888nike8888@mail.ru

Abstract. The article substantiates the relevance of developing energy recovery systems in the context of the depletion of fossil resources and stricter environmental requirements for transport and technological machines. Promising technologies for the recovery of kinetic, thermal, potential energy and vibrations are considered, and data on their effectiveness is analyzed. A direct dependence of the efficiency of recovery systems on the type of machine and its operating modes has been established, and the high effectiveness of hybrid solutions has been proven. It was revealed that the key directions for further research are the development of intelligent control systems, the creation of new materials and the comprehensive integration of recovery systems into machine design.

Keywords: energy recovery, transport and technological machines, energy efficiency, hybrid systems, kinetic systems, thermal systems, fuel consumption.

В настоящее время актуальными проблемами во всем мире являются стремительное истощение запасов ископаемого топлива и прогрессирующее загрязнение окружающей среды. Значительный вклад в усугубление этих глобальных вызовов вносит парк транспортно-технологических машин, остающийся одним из основных потребителей энергоресурсов. На его долю приходится существенная часть выбросов парниковых газов и

других вредных веществ, что обуславливает необходимость поиска кардинальных путей повышения энергоэффективности и сокращения экологического следа. Особую остроту данная проблема приобретает для сектора коммерческого и тяжелого транспорта, а также специализированной техники, где повсеместный переход к полной электрификации в краткосрочной перспективе представляется затруднительным [1-5].

При работе традиционных транспортно-технологических машин значительная доля энергии, получаемой из топлива, бесполезно рассеивается в окружающую среду. Анализ литературных данных показывает, что помимо известных потерь в системе торможения (до 30-50 % энергии движения), огромные объемы энергии рассеиваются в виде тепла через системы охлаждения и выхлопа двигателя (до 60-70% от энергии сгорания топлива), а также в виде механических колебаний и вибраций через системы подвески и шины. Эти потери не только снижают общий КПД машины, но и приводят к дополнительным затратам на охлаждение, повышают износ компонентов и усугубляют тепловое загрязнение [6-10].

Для решения этой проблемы, российскими и зарубежными учеными исследуются, разрабатываются и внедряются различные рекуперативные системы, позволяющие повысить общий КПД транспортных средств. Данные системы основаны на преобразовании рассеиваемой (вторичной) энергии в полезную электрическую, механическую или гидравлическую энергию. К основным из них относят: рекуперативное торможение (кинетические системы), преобразующие кинетическую энергию в электрическую посредством электромотора-генератора; системы утилизации тепла выхлопных газов и систем охлаждения (тепловые системы), такие как термоэлектрические генераторы на эффекте Зеебека, циклы Ренкина и турбокомпаундирование; системы рекуперации энергии вибраций подвески и кузова, использующие электромагнитные, пьезоэлектрические или гидравлические принципы. Отдельную группу составляют гидравлические системы рекуперации (гибридные гидромеханические), в которых кинетическая энергия торможения аккумулируется в пневмогидроаккумуляторах в виде энергии сжатого газа, и чисто механические системы, использующие маховики для накопления кинетической энергии. Перспективным направлением является рекуперация потенциальной энергии груза, которая рассеивается при его опускании в подъемно-транспортном оборудовании (краны, лифты, гидроманипуляторы) и может быть преобразована в электрическую энергию с помощью реверсивных электроприводов. Кроме того, ведутся исследования по рекуперации энергии в динамически нагруженных сцепных устройствах автопоездов и прицепов, где демпфирующие элементы могут оснащаться генераторами для преобразования энергии относительных продольных колебаний. Отдельное направление представляют собой гибридные системы, комбинирующие несколько источников для повышения эффективности. Каждый из этих методов имеет свою область применения, эффективность и уровень технологической готовности [1-20].

Системное внедрение технологий рекуперации энергии в мировом парке транспортных средств позволит не только существенно снизить потребление топлива и выбросы CO₂, но и уменьшить зависимость от ископаемых ресурсов. Для транспортно-технологических машин, характеризующихся интенсивными режимами работы с частыми циклами разгона-торможения и значительными тепловыми нагрузками, потенциал энергосбережения является особенно высоким. Это создает предпосылки для разработки более экономичных и экологичных образцов техники с повышенной энергетической самостоятельностью, вплоть до создания энергонезависимых вспомогательных систем [11-18].

Учитывая многообразие подходов и их комплексное влияние на конструкцию и эффективность транспортных средств, представляет значительный научный и

практический интерес детальный анализ принципов работы, потенциала и областей применения различных систем рекуперации энергии. В данной статье проводится комплексное исследование данного вопроса с фокусом на транспортно-технологические машины.

В исследовании Pawel Ruchala и др. выполнена оценка принципиальной возможности рекуперации кинетической энергии из возмущенного воздушного потока, создаваемого движущимся автомобилем. Проведенные в аэродинамической трубе испытания масштабной модели позволили точно составить подробную карту распределения скорости и направления воздушного потока в следе за автомобилем. Результаты показали, что область максимальной скорости воздуха, а, следовательно, и плотности кинетической энергии, локализована непосредственно за задней частью кузова. Ключевая идея предлагаемой системы энергосбора заключается в размещении стационарных преобразователей (микротурбин) на придорожной инфраструктуре, которые будут рекуперировать энергию, уже потраченную транспортным средством на преодоление аэродинамического сопротивления. Основное преимущество такого подхода – отсутствие необходимости установки дополнительного оборудования на сам автомобиль, что исключает увеличение его массы и стоимости. Восстановленная энергия потенциально может использоваться для питания маломощной дорожной инфраструктуры. Однако практическая реализация системы сопряжена с существенными трудностями: энергия в следе быстро рассеивается, а ее плотность, несмотря на пиковые значения, в целом невелика и распределена в пространстве. Главным недостатком является крайне короткое время взаимодействия преобразователя с энергетическим импульсом от каждого автомобиля и отсутствие данных о реальном КПД гипотетических улавливающих устройств, что ставит под вопрос общую эффективность и экономическую целесообразность такого решения [3].

В исследовании Bingyin Feng и др. представлены результаты комплексного анализа механическо-электрическо-гидравлических гибридных систем хранения энергии для рекуперации энергии на транспортных средствах. Основное внимание уделено гидравлическим системам рекуперации, которые обладают высокой удельной мощностью и эффективностью в циклах с частыми разгонами и торможениями. Принцип работы основан на преобразовании кинетической энергии при торможении в гидравлическую энергию посредством насос-моторов с аккумулярованием в гидроаккумуляторах высокого давления, с последующей рекуперацией накопленной энергии для помощи силовой установке при разгоне. Рассмотрены три базовые схемы: последовательная, параллельная и последовательно-параллельная, а также их применение в легковом, коммерческом и специальном транспорте. Установлено, что ключевым преимуществом гидравлических систем является высокая динамика энергообмена, а основным недостатком – низкая плотность энергии. Наиболее перспективным направлением признана интеграция гидравлических аккумуляторов с электрическими накопителями в составе гибридных систем, что даёт возможность оптимально сочетать их достоинства. Эффективность таких систем решающим образом зависит от применения оптимизированных стратегий управления [4].

В научной работе Bowen C. R. Проанализированы технологии рекуперации энергии для систем мониторинга давления в шинах с целью замены традиционных батарей. Основное внимание уделяется рекуперации кинетической энергии вращения колеса и энергии деформации шины в пятне контакта. Среди рассмотренных подходов доминируют пьезоэлектрические преобразователи, преобразующие механические напряжения непосредственно в электрический заряд. Пьезоэлектрические генераторы реализуются в двух основных конфигурациях: инерционные резонансные системы на основе консольных балок, устанавливаемых на обод колеса, и системы прямого

деформирования в виде гибких элементов, интегрируемых в корд шины. Преимущества включают высокую плотность энергии, совместимость с микроэлектромеханическими технологиями и отсутствие необходимости внешнего питания. К недостаткам относятся ограниченная полоса пропускания, хрупкость керамических материалов и чувствительность к температурным воздействиям. Сравнительный анализ показывает, что пьезоэлектрические системы демонстрируют превосходство по удельной мощности перед электромагнитными преобразователями, но требуют сложных схем согласования. Критическими задачами остаются разработка широкополосных систем для переменных скоростей вращения, обеспечение механической надежности и создание эффективных систем накопления энергии. Несмотря на существующие проблемы, достигнутый уровень генерации (десятки-сотни микроватт) подтверждает практическую реализуемость полностью автономных систем мониторинга [5].

В статье Davide Di Battista и др. исследована система утилизации тепловой энергии отработавших газов дизельного двигателя с использованием турбокомпаундирования. Рассматривается установка дополнительной турбины в выпускной тракт за основной турбиной турбокомпрессора. Принцип работы системы основан на преобразовании остаточной энтальпии газов в механическую мощность. Ключевой особенностью является компромисс между генерируемой мощностью и ростом противодавления, приводящим к увеличению насосных потерь двигателя. Результаты моделирования показали, что чистое снижение удельного расхода топлива достигает 8 % в зоне высоких нагрузок. Технология демонстрирует потенциал для интеграции в гибридные силовые установки, обеспечивая генерацию электроэнергии при высоком уровне технологической готовности [6].

В статье Kok Gnee Chua и др. проведён анализ рекуперации кинетической энергии дождевых капель с использованием пьезоэлектрических преобразователей. Принцип работы системы основан на прямом пьезоэлектрическом эффекте: механическая энергия удара капли преобразуется в колебания, которые пьезоэлектрический материал трансформирует в электрический заряд. Исследованы различные конструкции преобразователей – консольные, мостовые и мембранные, а также схемы управления для эффективного съёма энергии. Установлено, что основными проблемами являются низкий коэффициент полезного действия (менее 1 %) и малая плотность мощности существующих систем. Ключевые ограничения связаны с потерями энергии при ударе, неоптимальной геометрией преобразователей и отсутствием специализированных электронных схем, адаптированных к затухающим колебаниям. Перспективы развития связаны с оптимизацией материалов и конструкций, с разработкой эффективных преобразователей энергии и созданием гибридных систем для комплексного использования нескольких видов возобновляемой энергии [7].

Статья Ming Yuan и др. посвящена анализу технологий сбора акустической энергии, заключающегося в преобразовании энергии звуковых волн в электрическую. Основное внимание уделяется трем типам рекуперативных систем, используемых для усиления слабого звукового давления: резонаторам Гельмгольца, четвертьволновым резонаторам и структурам на основе акустических метаматериалов. Принцип их работы основан на создании акустического резонанса, который фокусирует и усиливает звуковое давление в зоне расположения преобразователя энергии – пьезоэлектрического, электромагнитного или трибоэлектрического. В качестве наиболее перспективной системы выделяются устройства на основе акустических метаматериалов. Их ключевые преимущества – субволновые масштабы, что позволяет создавать компактные низкочастотные резонаторы, а также эффекты локального резонанса для эффективного преобразования энергии. Основной недостаток – сложность обеспечения широкополосности. Автор заключает, что данная технология обладает значительным

потенциалом для питания маломощных устройств, однако для практической реализации требуется решение задач интеграции таких систем в инженерные конструкции и разработки эффективных систем управления энергией [8].

Исследование Oluwalana O. J. представляет комплексный анализ технологии солнечных электрических транспортных средств и фотоэлектрических систем, интегрированных в конструкцию автомобилей. На основе систематического обзора научных публикаций авторы исследуют эволюцию, современное состояние и перспективы развития этих технологий. Особое внимание уделяется достижениям в области повышения эффективности фотоэлектрических преобразователей, применению легких материалов и методам интеграции, а также проблемам энергоэффективности, климатической адаптации и экономической целесообразности. В качестве ключевого элемента рассматривается рекуперативная система торможения. Её принцип действия основан на преобразовании кинетической энергии транспортного средства в электрическую при торможении с последующей её аккумуляцией. Интеграция данной системы с фотоэлектрическими панелями и накопителями энергии позволяет оптимизировать общее энергопотребление. Согласно результатам исследований, такая комбинация обеспечивает увеличение запаса хода до 30,6 %. К основным проблемам относят сложность управления энергопотоками при переменных условиях эксплуатации и необходимость совершенствования прогнозных алгоритмов [9].

В статье Royale A. и Simic M. исследуется перспективная гибридная система рекуперации тепловой энергии для транспортных средств, основанная на прямом отборе тепла из камеры сгорания двигателя. В отличие от традиционных подходов, использующих тепло выхлопных газов, предлагаемая система размещает термоэлектрический генератор непосредственно в цилиндре, что позволяет преобразовывать в электричество высокопотенциальную тепловую энергию (500-900 °C) на стадии сгорания топлива. Принцип работы основан на комбинации термоэлектрического преобразования (эффект Зеебека) и парового цикла Ренкина. Ключевое преимущество – повышение общего КПД силовой установки за счет утилизации энергии, традиционно теряемой в окружающую среду, и создание мощного источника электроэнергии для гибридного привода. К основным техническим проблемам реализации относятся сохранение геометрии и степени сжатия камеры сгорания, обеспечение термостойкости конструкции с применением тугоплавких материалов, организация эффективного охлаждения модуля и электромагнитная совместимость с системой зажигания. Авторы приходят к выводу, что, несмотря на значительный потенциал для снижения расхода топлива и выбросов, предложенная концепция требует дальнейших исследований, проектирования прототипа и испытаний для подтверждения своей практической осуществимости и надежности в условиях экстремальных термических и механических нагрузок [10].

Maciejewski I. и др. исследовали рекуперативную систему активной горизонтальной подвески сиденья, предназначенную для одновременного гашения вибраций и регенерации энергии. В качестве исполнительного механизма и генератора используется синхронный двигатель с постоянными магнитами. Ключевой особенностью системы является её четырёхквadrантный режим работы: в двух квадрантах двигатель потребляет энергию для активного гашения вибраций, а в двух других – переходит в режим рекуперативного торможения, преобразуя кинетическую энергию колебаний в электрическую. Управление переключением между режимами осуществляется на основе знака произведения желаемого усилия и относительной скорости подвески. Сравнительные испытания с пассивной и активной системами под случайными вибрациями показали, что рекуперативная система по эффективности виброизоляции занимает промежуточное положение. Её главное преимущество –

энергоэффективность. Анализ мощности показал, что система способна генерировать электроэнергию, причём наибольшая рекуперация наблюдалась при вибрациях с узким частотным спектром и высокой амплитудой. Основным выводом является подтверждение возможности создания гибридной системы, сочетающей функции активного гашения вибраций и регенерации энергии, хотя количество восстанавливаемой энергии на данном этапе требует дальнейшей оптимизации для практического применения [11].

В статье Zhu В. и др. исследуется проблема низкого термического КПД двигателей внутреннего сгорания, значительная часть энергии которых рассеивается через системы охлаждения и выхлопа. Для её решения предложена рекуперативная система, использующая технологию теплового аккумулятора на основе материалов с фазовым переходом. Ключевая особенность системы – способность накапливать, а не только использовать в реальном времени тепло выхлопных газов. Принцип работы заключается в передаче тепла от выхлопных газов через теплообменник теплоаккумулирующему материалу – гидрату гидроксида бария с температурой фазового перехода 78 °С. Накопленная энергия в дальнейшем используется для предварительного подогрева охлаждающей жидкости двигателя при холодном пуске. Разработана и верифицирована экспериментально математическая модель системы теплового управления. Анализ четырёх режимов нагрева показал, что комбинированное использование теплового аккумулятора и теплообменника утилизации тепла выхлопных газов является наиболее эффективным. Результаты моделирования в различных циклах движения продемонстрировали максимальное сокращение времени прогрева на 22,52 % и снижение расхода топлива на 24,7 % по сравнению со стандартным холодным пуском [12].

В статье Ji Р. и др. исследована рекуперативная система накопления энергии для транспортных средств, основанная на комбинации маховикового накопителя и магнитной муфты. Принцип работы устройства основан на бесконтактной передаче крутящего момента посредством осевого перемещения магнитного кольца, которое изменяет степень магнитного взаимодействия между ведущим и ведомым валами. Это позволяет управлять процессом накопления энергии в маховике при торможении и ее отдачи при разгоне. Ключевыми особенностями системы являются плавное бесступенчатое соединение валов, отсутствие механического контакта, а также функции защиты от перегрузок. Экспериментальные исследования подтвердили высокую эффективность устройства, достигшую 93 % при передаче крутящего момента 240 Н · м и скорости вращения 1200 об/мин. Моделирование в стандартных ездовых циклах показало, что эффективность рекуперации энергии торможения достигает 35,59 %. Полученные результаты демонстрируют перспективность применения магнитной муфты в системах рекуперативного торможения для повышения энергоэффективности транспортных средств [13].

Masser R. и др. исследовали метод снижения расхода топлива коммерческих автомобилей с самосвальными кузовами за счет оптимизации управления системой гидравлической рекуперации энергии. Принцип работы системы основан на использовании гидравлического насоса-мотора, соединенного с карданным валом. При торможении агрегат функционирует в режиме насоса, запасая энергию в гидроаккумуляторе за счет сжатия газа. При разгоне система работает в режиме мотора, возвращая накопленную энергию для помощи двигателю внутреннего сгорания. Ключевым преимуществом является применение существующего гидравлического контура автомобиля, что снижает стоимость внедрения [14].

В статье Jie Zhang анализируется проблема утилизации тепловой энергии, выделяющейся при торможении автомобиля. Данное направление, недостаточно

изученное по сравнению с рекуперацией кинетической энергии. В качестве решения предложена конструкция системы рекуперации на основе термоэлектрического генератора. Принцип работы основан на эффекте Зеебека: термоэлектрические модули, установленные на внутренней поверхности тормозного диска, нагреваются, а их холодные стороны активно охлаждаются фазовыми теплоотводами, использующими набегающий воздушный поток. Создаваемый перепад температур преобразуется в электрическую энергию. Ключевыми особенностями системы являются интеграция в конструкцию тормозного диска и применение эффективного пассивного охлаждения. К преимуществам отнесены модульность, удобство обслуживания и универсальность. Отмечается, что система позволяет повысить общую энергоэффективность транспортного средства [15].

Rausa G. провел в своей работе всесторонний обзор рекуперативных энергетических систем, предназначенных для повышения эффективности полностью электрических и гибридных транспортных средств. Исследование сфокусировано на трех основных категориях: механических, тепловых и гибридных или экологических решениях, таких, как солнечные и ветровые. В рамках механического восстановления энергии детально анализируются системы рекуперации кинетической энергии: рекуперативные подвески, преобразующие колебания в электричество с помощью электрогенераторов, а также пьезоэлектрические системы, преобразующие вибрации и деформации в ток. Тепловое восстановление энергии рассматривает термоэлектрические генераторы, работающие на эффекте Зеебека для конверсии тепла выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания, и системы на основе органического цикла Рэнкина. В гибридных решениях изучается комбинация механических и тепловых систем, а также интеграция солнечных панелей и ветрогенераторов. Принцип работы этих систем основан на преобразовании рассеиваемой энергии в полезную электрическую. Ключевые выводы автора заключаются в том, что, несмотря на значительный прогресс, основными проблемами остаются невысокий коэффициент полезного действия, долговечность материалов и сложность интеграции в транспортное средство без ухудшения других характеристик. Преимущества включают повышение общей энергоэффективности, увеличение запаса хода и снижение выбросов. В качестве будущего развития автор видит необходимость в совершенствовании материалов, оптимизации систем управления энергией и создании гибридных решений, комбинирующих несколько технологий для максимизации сбора энергии [16].

Статья Li J. и др. посвящена проблеме низкой энергоэффективности гидравлических экскаваторов, в частности, рекуперации потенциальной энергии стрелы. В качестве решения исследуется механическая система накопления энергии с маховиком, интегрированная в стандартную гидравлическую систему со следящим нагрузочным регулированием. При опускании стрелы насос-мотор, связанный с маховиком, работает в двигательном режиме, преобразуя энергию потока жидкости из цилиндра в кинетическую энергию вращения маховика. При последующем подъеме тот же агрегат функционирует как насос, используя запасенную энергию маховика для подачи жидкости в цилиндр, снижая нагрузку на основной насос. Основным преимуществом системы является высокая энергоэффективность, демонстрирующая экономию энергии до 48,9 % в ненагруженном рабочем цикле. Дополнительное преимущество – высокое значение удельной энергоемкости маховика по сравнению с гидравлическими аккумуляторами. К недостаткам относится более низкое быстродействие по сравнению с дроссельными системами. Вывод исследования подтверждает перспективность применения маховиковых систем для значительного снижения энергопотребления спецтехники [17].

Статья Rudzki C. и др. посвящена исследованию влияния параметров гидроаккумулятора на эффективность системы рекуперации энергии в гидроприводе

рабочего оборудования колесного погрузчика. Для этого была разработана верифицированная совместная модель, интегрирующая механическую подсистему, созданную в среде многокомпонентного динамического моделирования, и гидравлическую подсистему привода подъема стрелы. Модель базировалась на реальном погрузчике, а ее параметры были идентифицированы посредством натурных экспериментов, что обеспечило высокую достоверность имитации рабочих процессов. Принцип работы рекуперативной системы основан на накоплении потенциальной энергии опускающейся стрелы с грузом. Вместо слива жидкости в бак при опускании, она направляется в гидроаккумулятор, где энергия запасается в виде давления сжатого газа. В последующем цикле подъема накопленная энергия используется для начального перемещения стрелы, снижая нагрузку на основной насос. Результаты моделирования показали, что эффективность системы критически зависит от предварительного давления и объема аккумулятора. Установлено, что снижение объема на 75 % приводит к падению количества рекуперированной энергии на 52 %. Максимальная экономия энергии за цикл составила 11 % при оптимальных параметрах аккумулятора. Направлением дальнейших исследований определено изучение влияния переменной массы груза и алгоритмов управления системой [18].

В статье Aridi R. и др. проводится комплексный анализ систем рекуперации тепла в системах вентиляции и кондиционирования. Исследование систематизирует технологии утилизации тепловой энергии, разделяя их на два ключевых направления: использование сбросного тепла для сторонних нужд и его применение для повышения энергоэффективности самой системы. Основное внимание уделяется сравнительной оценке рекуперативных устройств. Рассматриваются принципы работы, преимущества и недостатки ключевых типов теплоутилизаторов. Энтальпийные роторы и мембранные пластинчатые теплообменники демонстрируют высокую эффективность за счет передачи как явного, так и скрытого тепла, что особенно значимо в условиях влажного климата. Тепловые трубы и термосифоны, обладая пассивной работой и надежностью, рекуперировать только явное тепло. Анализ показывает, что выбор оптимального устройства определяется климатическими условиями: системы с рекуперацией влаги наиболее эффективны в регионах с высокой влажностью, тогда как геотермальные теплообменники лучше проявляют себя в жарком сухом климате [19].

Статья Zhou W. и др. посвящена анализу технологии сбора вибрационной энергии на основе пьезоэлектрического эффекта. Данная технология рассматривается как перспективное решение для автономного питания маломощных устройств. Принцип работы основан на прямом пьезоэлектрическом эффекте, при котором деформация пьезоматериала под действием механических вибраций генерирует электрический заряд. Авторы исследуют три основных режима работы пьезоэлементов: поперечный, продольный и сдвиговый. Сдвиговый режим демонстрирует наибольшую эффективность преобразования энергии, однако его практическая реализация сопряжена с техническими сложностями. В статье проводится классификация устройств по типу внешнего воздействия на резонансные и ударные, анализируются их преимущества и ограничения. К ключевым проблемам технологии относятся узкий рабочий частотный диапазон резонансных систем и ограниченная выходная мощность [20].

Проведенный анализ современных научных исследований и инженерных разработок демонстрирует значительное разнообразие подходов к рекуперации энергии на транспортно-технологических машинах. Однако для комплексной оценки их практического потенциала и выбора наиболее эффективных решений для конкретных применений необходим переход от качественного описания к количественному сопоставлению. Систематизация данных, извлеченных из рассмотренных источников, позволяет провести такое сравнение по ключевым показателям: эффективности

преобразования, влиянию на расход топлива и энергосберегающему потенциалу в характерных рабочих циклах.

На основе углубленного изучения научных статей были сформированы сводные таблицы 1-5, которые наглядно ранжируют рассмотренные технологии по их энергетической отдаче. В области рекуперации кинетической энергии (табл. 1) данные показывают, что, хотя традиционные электромотор-генераторы лидируют по эффективности (60-70 %), альтернативные системы, такие как гидравлические аккумуляторы и маховики, находят свою нишу в технике с интенсивными циклами «разгон-торможение», демонстрируя экономию топлива до 20-30 %. Наиболее значительные количественные результаты, согласно анализу, достигаются в секторе рекуперации тепловой и потенциальной энергии (табл. 2 и 3). Так, применение теплового аккумулятора с фазовым переходом позволяет добиться существенного снижения расхода топлива на 24,7 % за счет оптимизации холодного пуска. А маховиковая система на экскаваторе обеспечивает экономию энергии в почти 50 % рабочего цикла, что подтверждает высочайший потенциал рекуперации не в тяговых, а в технологических операциях. Важно отметить, что количественные показатели сильно зависят от режимов работы. Эффективность, заявленная в исследованиях, достигается в определенных, зачастую оптимальных, условиях. Результативность системы с гидроаккумулятором на погрузчике напрямую определяется его предварительным давлением и объемом, а эффективность турбокомпаундирования достигает 8 % лишь в зоне высоких нагрузок.

Таблица 1 – Рекуперация кинетической энергии

Table 1 – Kinetic energy recovery

Технология	Принципа работы	Эффективность рекуперации (на цикл)	Потенциал снижения расхода топлива	Область применения	Уровень технологической готовности
Обратимые электромашин	Преобразование кинетической энергии в электрическую с зарядкой АКБ	60-70 %	До 25-30 % в городском цикле	Легковые и коммерческие автомобили, гибриды	Высокий (серийное производство)
Гидравлический аккумулятор	Преобразование кинетической энергии в давление сжатого газа	50-65%	20-30 % для техники с частыми остановками	Мусоровозы, автобусы, погрузчики	Средний (опытные парки)
Маховик с магнитной муфтой	Накопление энергии во вращающемся маховике	35 %	—	Перспективные разработки для транспорта	Средний (экспериментальные образцы)

Таблица 2 – Рекуперация тепловой энергии
Table 2 – Thermal energy recovery

Технология	Источник тепла (принцип)	Преобразованная мощность (эффективность)	Влияние на расход топлива	Примечания
Турбокомпаундирование	Отработавшие газы (дополнительная турбина)	–	Снижение удельного расхода топлива на 8 % (зона высоких нагрузок)	Высокая технологическая готовность, но рост противодействия
Термоэлектрический генератор	Тепло выхлопных газов (эффект Зеебека)	2-5 % от энергии выхлопа	2-4 % (за счет питания бортовой сети)	Высокая надежность, но низкий КПД и дорогие материалы
Тепловой аккумулятор с фазовым переходом	Отработавшие газы (нагрев материала с последующим использованием)	–	Снижение расхода топлива на 24,7 % и времени прогрева на 22,52 % (при холодном пуске)	Эффективность максимальна в комбинации с теплообменником
Термоэлектрический генератор в тормозном диске	Кинетическое тепло торможения	–	Повышение общей энергоэффективности	Перспективная, но малоизученная технология

Таблица 3 – Рекуперация потенциальной энергии и энергии рабочих органов
Table 3 – Recovery of potential energy and energy of working bodies

Технология	Объект рекуперации (принцип)	Достижимая экономия энергии	Применение	Ключевое преимущество
Гидроаккумулятор	Потенциальная энергия опускающейся стрелы погрузчика	До 11 % за рабочий цикл (при оптимизации параметров)	Колесные погрузчики, экскаваторы	Эффективность критически зависит от предварительного давления и объема аккумулятора
Маховичный накопитель	Потенциальная энергия стрелы экскаватора	48,9 % в ненагруженном рабочем цикле	Гидравлические экскаваторы	Высокая удельная энергоемкость по сравнению с гидроаккумуляторами
Реверсивный электропривод	Потенциальная энергия опускаемого груза	До 40-60 %	Краны, лифты, гидроманипуляторы	Стандартное решение для подъемно-транспортной техники

Таблица 4 – Рекуперация энергии вибраций и колебаний
Table 4 – Recovery of vibration and oscillation energy

Технология	Принцип (конструкция)	Генерируемая мощность	Эффективность (применение)	Недостатки
Активная подвеска с рекуперацией	Электродвигатель-генератор	—	Система энергоэффективна, но количество энергии невелико. Наибольшая рекуперация при узком спектре и высокой амплитуде	Промежуточная эффективность виброизоляции между пассивной и активной системами
Пьезоэлектрические генераторы (в шинах)	Деформация пьезоэлемента в пятне контакта (на ободе)	Десятки-сотни микроватт	Достаточно для автономного питания датчиков давления в шинах. Высокая удельная мощность	Узкая полоса пропускания, хрупкость, чувствительность к температуре
Пьезоэлектрические генераторы (общие)	Прямой пьезоэффект (поперечный, продольный, сдвиговый режимы)	Низкая	Перспективны для питания маломощных устройств. Наиболее эффективен сдвиговый режим	Низкая выходная мощность, узкий частотный диапазон (для резонансных систем)

Проведенный комплексный анализ позволяет сформулировать ряд ключевых выводов, подтверждающих значительный энергосберегающий потенциал систем рекуперации для транспортно-технологических машин. Количественная оценка демонстрирует, что рекуперация потенциальной энергии стрелы экскаватора позволяет достичь экономии энергии до 48,9 % в рабочем цикле, а системы утилизации тепла выхлопных газов способны снизить удельный расход топлива примерно на 8 %. При этом анализ выявил отсутствие универсального технологического решения, так как эффективность каждой системы жестко привязана к типу и режиму работы конкретной машины. Техника с частыми циклами «разгон-торможение» максимально эффективно использует кинетические системы, тогда как машины с рабочими органами – системы рекуперации потенциальной энергии. Важнейшим направлением является приоритет гибридных решений, которые комбинируют преимущества разных технологий, таких как гидравлические и электрические накопители, для достижения синергетического эффекта. Установлено, что основным барьером для массового внедрения является не только КПД преобразования, но и сложность системной интеграции рекуперативных систем в конструкцию машины без ухудшения ее массогабаритных и стоимостных характеристик, где ключевую роль играют алгоритмы управления.

Таблица 5 – Гибридные системы рекуперации энергии
Table 5 – Hybrid energy recovery systems

Технология	Принцип работы (источник)	Количественная оценка эффективности	Область применения	Примечания
Солнечные панели и рекуперативное торможение	Комбинация фотоэлектрических панелей и рекуперации кинетической энергии	Увеличение запаса хода до 30,6 %	Электромобили	Основная проблема – сложность управления энергопотоками
Гибридная гидроэлектрическая система	Комбинация гидравлического аккумулятора (высокая мощность) и АКБ (высокая плотность энергии)	Эффективность решающим образом зависит от стратегии управления	Коммерческий и тяжелый транспорт	Позволяет взаимодополняющее сочетание достоинств разных накопителей
Использование энергии ветра	Микротурбины на дорожной инфраструктуре	Энергетическая плотность в следе невелика, КПД устройств неизвестен	Придорожная инфраструктура	Под вопросом общая эффективность и экономическая целесообразность

Выявленные проблемы и тенденций позволяют обозначить перспективные направления для будущих исследований. На первом месте находится разработка адаптивных интеллектуальных систем управления энергопотоками, которые смогут в реальном времени оптимизировать работу разнородных накопителей. Параллельно необходимы интенсивные исследования в области новых материалов – высокоэффективных термоэлектриков и широкополосных пьезоэлектрических преобразователей, способных работать в переменных режимах. Крайне актуальной задачей является создание комплексных гибридных систем, одновременно утилизирующих несколько видов энергии на одной машине, например, тепловую, кинетическую и потенциальную. Особую перспективу имеет интеграция рекуперативных функций на уровне конструкции узлов машины, таких как активные тормозные диски со встроенными термоэлементами или силовые элементы с пьезопреобразователями. Хотя нетрадиционные направления, вроде улавливания энергии воздушного следа, пока имеют небольшую эффективность, они представляют фундаментальный научный интерес для систем питания автономной инфраструктуры. Перспективным направлением является также работа над стандартизацией и модульностью рекуперативных систем, что позволит снизить их стоимость и упростить внедрение на различные типы техники. Таким образом, системный подход, сочетающий глубокий анализ потерь, применение новых материалов и интеллектуальное управление, открывает путь к созданию нового поколения энергоэффективных и экологичных транспортно-технологических машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Посметьев, В. И. Обоснование целесообразности оснащения лесовозных автопоездов рекуперативными тягово-сцепными устройствами по результатам имитационного моделирования / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2023. – 204 с.
2. Посметьев, В. И. Повышение эффективности лесовозных автопоездов с помощью

рекуперативных седельно-цепных и поворотных кониковых устройств : монография / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2024. – 282 с.

3. Ruchala P., Orynycz O., Stryczniewicz W., Tucki K. Possibility of Energy Recovery from Airflow around an SUV-Class Car Based on Wind Tunnel Testing. *Energies* 2023, 16, 6965. <https://doi.org/10.3390/en16196965>.

4. Feng B., Xu H., Wang A., Gao L., Bi Y., Zhang X. A Comprehensive Review of Energy Regeneration and Conversion Technologies Based on Mechanical-Electric-Hydraulic Hybrid Energy Storage Systems in Vehicles. *Appl. Sci.* 2023, 13, 4152. <https://doi.org/10.3390/app13074152>.

5. Bowen C. R., Arafa M. H. Energy harvesting technologies for tire pressure monitoring systems, *Advanced Energy Materials*, 2015, vol. 5, № 7. <https://doi.org/10.1002/aenm.201401787>.

6. Di Battista D., Di Bartolomeo M., Di Prospero F., Diomedede D., Carapellucci R., Cipollone R. Turbocompound energy recovery option on a turbocharged diesel engine. *Journal of Physics : Conference Series*. IOP Publishing 2648 (2023) 012078 doi:10.1088/1742-6596/2648/1/012078.

7. Chua K. G., Hor Y. F., Lim H. C. Raindrop Kinetic Energy Piezoelectric Harvesters and Relevant Interface Circuits : Review, Issues and Outlooks. *Sensors & Transducers*, Vol. 200, Issue 5, May 2016, pp. 1-15.

8. Yuan M., Cao Z., Luo J., Chou X. Recent Developments of Acoustic Energy Harvesting : A Review. *Micromachines* 2019, 10, 48. doi:10.3390/mi10010048.

9. Oluwalana O. J., Grzesik K. Solar-Powered Electric Vehicles : Comprehensive Review of Technology Advancements, Challenges, and Future Prospects. *Energies* 2025, 18, 3650. <https://doi.org/10.3390/en18143650>.

10. Royale A., Simic M. Research in vehicles with thermal energy recovery systems. 19th International Conference on Knowledge Based and Intelligent Information and Engineering Systems. *Procedia Computer Science* 60 (2015) 1443-1452.

11. Maciejewski I., Pecolt S., Blazejewski A., Jereczek B., Krzyzynski T. Experimental Study of the Energy Regenerated by a Horizontal Seat Suspension System under Random Vibration. *Energies* 2024, 17, 4341. <https://doi.org/10.3390/en17174341>.

12. Zhu B., Zhang Y., Wang D. Investigation of Engine Exhaust Heat Recovery Systems Utilizing Thermal Battery Technology. *World Electr. Veh. J.* 2024, 15, 478. <https://doi.org/10.3390/wevj15100478>.

13. Ji P., Nie W.-W., Liu J.-L. Research on Magnetic Coupling Flywheel Energy Storage Device for Vehicles. *Appl. Sci.* 2023, 13, 6036. <https://doi.org/10.3390/app13106036>.

14. Masser R., Hoffmann K. H. Optimal Control for a Hydraulic Recuperation System Using Endoreversible Thermodynamics. *Appl. Sci.* 2021, 11, 5001. <https://doi.org/10.3390/app11115001>.

15. Jie Zhang Design of Automobile Brake Waste Heat Recovery Device. *International Conference on Applied Science and Engineering Innovation (ASEI 2015)*. – pp. 1964-1968.

16. Rausa G., Calabrese M., Velazquez R., Del-Valle-Soto C., Fazio R. D., Visconti P. Mechanical, Thermal, and Environmental Energy Harvesting Solutions in Fully Electric and Hybrid Vehicles: Innovative Approaches and Commercial Systems. *Energies* 2025, 18, 1970. <https://doi.org/10.3390/en18081970>.

17. Li J., Han Y., Li S. Flywheel-Based Boom Energy Recovery System for Hydraulic Excavators with Load Sensing System. *Actuators* 2021, 10, 126. <https://doi.org/10.3390/act10060126>.

18. Rudzki C., Bartnicki A., Rubiec A., Muszynski T., Przybysz M. Experiment Driven Co-Simulation Model of Wheel Loader Attachment Hydraulics System for Influence Assessment of Hydraulic Accumulator Parameters on Energy Recuperation Efficiency. *Energies* 2025, 18, 4208. <https://doi.org/10.3390/en18154208>.

19. Aridi R., Faraj J., Ali S., Gad El-Rab M., Lemenand T., Khaled M. Energy Recovery in Air Conditioning Systems : Comprehensive Review, Classifications, Critical Analysis, and Potential Recommendations. *Energies* 2021, 14, 5869. <https://doi.org/10.3390/en14185869>.

20. Zhou W., Du D., Cui Q., Lu C., Wang Y., He Q. Recent Research Progress in Piezoelectric Vibration Energy Harvesting Technology. *Energies* 2022, 15, 947. <https://doi.org/10.3390/en15030947>.

REFERENCES

1. Posmetev, V. I. Justification of the Feasibility of Equipping Timber Road Trains with Regenerative

Drawbar Couplings Based on Simulation Modeling Results / V. I. Posmetev, V. O. Nikonov, V. V. Posmetev. – Voronezh : Voronezh State Forest Engineering University named after G. F. Morozov, 2023. – 204 p.

2. Posmetev, V. I. Improving the Efficiency of Timber Road Trains with the Help of Regenerative Fifth-Handle Couplings and Pivoting Cone Couplings : Monograph / V. I. Posmetev, V. O. Nikonov, V. V. Posmetev – Voronezh : Voronezh State Forest Engineering University named after G. F. Morozov, 2024. – 282 p.

3. Ruchala P., Orynych O., Stryczniewicz W., Tucki K. Possibility of Energy Recovery from Airflow around an SUV-Class Car Based on Wind Tunnel Testing. *Energies* 2023, 16, 6965. <https://doi.org/10.3390/en16196965>.

4. Feng B., Xu H., Wang A., Gao L., Bi Y., Zhang X. A Comprehensive Review of Energy Regeneration and Conversion Technologies Based on Mechanical-Electric-Hydraulic Hybrid Energy Storage Systems in Vehicles. *Appl. Sci.* 2023, 13, 4152. <https://doi.org/10.3390/app13074152>.

5. Bowen C. R., Arafa M. H. Energy harvesting technologies for tire pressure monitoring systems, *Advanced Energy Materials*, 2015, vol. 5, № 7. <https://doi.org/10.1002/aenm.201401787>.

6. Di Battista D., Di Bartolomeo M., Di Prospero F., Diomedede D., Carapellucci R., Cipollone R. Turbocompound energy recovery option on a turbocharged diesel engine. *Journal of Physics : Conference Series*. IOP Publishing 2648 (2023) 012078 doi:10.1088/1742-6596/2648/1/012078.

7. Chua K. G., Hor Y. F., Lim H. C. Raindrop Kinetic Energy Piezoelectric Harvesters and Relevant Interface Circuits : Review, Issues and Outlooks. *Sensors & Transducers*, Vol. 200, Issue 5, May 2016, pp. 1-15.

8. Yuan M., Cao Z., Luo J., Chou X. Recent Developments of Acoustic Energy Harvesting : A Review. *Micromachines* 2019, 10, 48. doi:10.3390/mi10010048.

9. Oluwalana O. J., Grzesik K. Solar-Powered Electric Vehicles : Comprehensive Review of Technology Advancements, Challenges, and Future Prospects. *Energies* 2025, 18, 3650. <https://doi.org/10.3390/en18143650>.

10. Royale A., Simic M. Research in vehicles with thermal energy recovery systems. 19th International Conference on Knowledge Based and Intelligent Information and Engineering Systems. *Procedia Computer Science* 60 (2015) 1443-1452.

11. Maciejewski I., Pecolt S., Blazejewski A., Jereczek B., Krzyzynski T. Experimental Study of the Energy Regenerated by a Horizontal Seat Suspension System under Random Vibration. *Energies* 2024, 17, 4341. <https://doi.org/10.3390/en17174341>.

12. Zhu B., Zhang Y., Wang D. Investigation of Engine Exhaust Heat Recovery Systems Utilizing Thermal Battery Technology. *World Electr. Veh. J.* 2024, 15, 478. <https://doi.org/10.3390/wevj15100478>.

13. Ji P., Nie W.-W., Liu J.-L. Research on Magnetic Coupling Flywheel Energy Storage Device for Vehicles. *Appl. Sci.* 2023, 13, 6036. <https://doi.org/10.3390/app13106036>.

14. Masser R., Hoffmann K. H. Optimal Control for a Hydraulic Recuperation System Using Endoreversible Thermodynamics. *Appl. Sci.* 2021, 11, 5001. <https://doi.org/10.3390/app11115001>.

15. Jie Zhang Design of Automobile Brake Waste Heat Recovery Device. *International Conference on Applied Science and Engineering Innovation (ASEI 2015)*. – pp. 1964-1968.

16. Rausa G., Calabrese M., Velazquez R., Del-Valle-Soto C., Fazio R. D., Visconti P. Mechanical, Thermal, and Environmental Energy Harvesting Solutions in Fully Electric and Hybrid Vehicles: Innovative Approaches and Commercial Systems. *Energies* 2025, 18, 1970. <https://doi.org/10.3390/en18081970>.

17. Li J., Han Y., Li S. Flywheel-Based Boom Energy Recovery System for Hydraulic Excavators with Load Sensing System. *Actuators* 2021, 10, 126. <https://doi.org/10.3390/act10060126>.

18. Rudzki C., Bartnicki A., Rubiec A., Muszynski T., Przybysz M. Experiment Driven Co-Simulation Model of Wheel Loader Attachment Hydraulics System for Influence Assessment of Hydraulic Accumulator Parameters on Energy Recuperation Efficiency. *Energies* 2025, 18, 4208. <https://doi.org/10.3390/en18154208>.

19. Aridi R., Faraj J., Ali S., Gad El-Rab M., Lemenand T., Khaled M. Energy Recovery in Air Conditioning Systems : Comprehensive Review, Classifications, Critical Analysis, and Potential Recommendations. *Energies* 2021, 14, 5869. <https://doi.org/10.3390/en14185869>.

20. Zhou W., Du D., Cui Q., Lu C., Wang Y., He Q. Recent Research Progress in Piezoelectric Vibration Energy Harvesting Technology. *Energies* 2022, 15, 947. <https://doi.org/10.3390/en15030947>.