

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

Вадим Олегович Никонов ¹, Валерий Иванович Посметьев ²

^{1,2} Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова,

г. Воронеж, Россия,

¹ 8888nike8888@mail.ru

Аннотация. В статье обоснована перспективность систем рекуперативного торможения для повышения энергоэффективности легковых автомобилей в условиях города. Рассмотрено преимущество электрических систем, заключающееся в их высоком КПД (до 85 %). Разработана математическая модель, оценивающая рекуперированную энергию и расход топлива с учетом ключевых эксплуатационных параметров. Выявлено, что эффективность рекуперации максимальна при скоростях 60-80 км/ч и высокой частоте торможений. Установлено, что внедрение таких систем обеспечивает экономию топлива до 30 % в городском цикле, подтверждая их высокую эффективность.

Ключевые слова: рекуперативное торможение, энергоэффективность, легковой автомобиль, математическая модель, рекуперированная энергия, расход топлива, городской цикл, системы рекуперации.

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF REGENERATIVE BRAKING SYSTEMS OF PASSENGER CARS

Vadim Olegovich Nikonov ¹, Valery Ivanovich Posmetev ²

^{1,2} Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov,

Voronezh, Russia,

¹ 8888nike8888@mail.ru

Abstract. This article explores the potential of regenerative braking systems for improving the energy efficiency of passenger cars in urban environments. The advantage of electric systems, their high efficiency (up to 85 %), is discussed. A mathematical model is developed that evaluates recovered energy and fuel consumption, taking into account key operating parameters. It is found that regenerative braking efficiency is highest at speeds of 60-80 km/h and high braking frequency. The implementation of such systems has been shown to provide fuel savings of up to 30 % in urban driving, confirming their high efficiency.

Keywords: regenerative braking, energy efficiency, passenger car, mathematical model, recoverable energy, fuel consumption, urban cycle, recuperation systems.

Повышение энергоэффективности легковых автомобилей является одной из ключевых задач современного транспорта в условиях истощения природных ресурсов и постоянного роста цен на топливо. Традиционный двигатель внутреннего сгорания обладает крайне низким коэффициентом полезного действия, так как значительная часть энергии топлива рассеивается в виде тепла. Особенно большие потери происходят в режимах городской езды с частыми разгонами и замедлениями, где до 30 % энергии, полученной от сжигания топлива, тратится на преодоление сил трения при торможении. Эта кинетическая энергия движения безвозвратно теряется, преобразуясь в тепло в тормозных дисках и колодках. Таким образом, сокращение этих потерь напрямую способствует снижению

эксплуатационных расходов и повышению экономической эффективности транспортных средств [1, 2].

Снижение вредных выбросов автомобильного транспорта, особенно в городских условиях, является критически важным для улучшения качества воздуха и здоровья населения. Транспорт остается одним из основных источников загрязнения атмосферы такими веществами, как CO₂, оксиды азота, а также твердыми частицами. Рекуперативное торможение позволяет сократить выбросы за счет уменьшения нагрузки на двигатель внутреннего сгорания и частичного замещения его работы накопленной энергией. Внедрение систем рекуперации является необходимым шагом для снижения негативного воздействия на окружающую среду. Потенциал экономии топлива от использования рекуперации энергии торможения весьма значителен как на уровне одного автомобиля, так и в глобальном масштабе. Для одного автомобиля в городском цикле с частыми разгонами и торможениями экономия топлива может достигать 25-30 %, что напрямую снижает транспортные затраты. В пересчете на глобальный уровень, массовое внедрение таких систем может сохранить миллионы тонн топлива ежегодно. Это не только дает колоссальный экономический эффект, но и приводит к пропорциональному снижению объема вредных выбросов в атмосферу. Поэтому разработка и совершенствование устройств рекуперации является стратегически важным направлением для устойчивого развития автомобильной промышленности [3, 4].

Выполненный анализ научно-исследовательских работ позволил выделить ряд наиболее перспективных типов систем рекуперации энергии при торможении легкового автомобиля (табл. 1).

Таблица 1 – Сравнительная таблица типов систем рекуперативного торможения
Table 1 – Comparison table of types of regenerative braking systems

Тип системы	Принцип работы	Преимущества	Недостатки
Электрическая	Кинетическая энергия через трансмиссию передается на электродвигатель, который переходит в генераторный режим. Вырабатываемое электричество заряжает тяговую аккумуляторную батарею или суперконденсатор	Высокий КПД (70-85 %). Простота внедрения в электромобили и гибриды. Совместимость с интеллектуальным и системами управления энергией	Эффективность зависит от состояния заряда и температуры батареи. Высокая стоимость компонентов. Снижение эффективности при низких скоростях
Механическая	Энергия торможения через вариатор или муфту раскручивает маховик. При последующем разгоне накопленная кинетическая энергия маховика возвращается на колеса	Очень быстрый отклик и высокий КПД (до 80 %). Долгий срок службы. Экологичность (не зависит от химических батарей)	Ограниченное время хранения энергии. Трудности встраивания в трансмиссию. Гироскопический эффект, влияющий на управляемость. Шум и вибрации
Гидравлическая	При торможении гидравлический насос закачивает жидкость,	Высокая мощность, применимость в тяжелых режимах.	Низкий КПД (45-60 %). Громоздкая и

	сжимаемая газ в пневмогидроаккумуляторе высокого давления. При ускорении жидкость под давлением вращает гидромотор, передающий энергию на колеса	Надежность конструкции	тяжелая конструкция. Чувствительность к температурным колебаниям
Пневматическая	Кинетическая энергия используется для привода компрессора, который сжимает воздух и накапливает его в баллоне (ресивере). При необходимости сжатый воздух используется для привода пневмомотора или турбины	Простота конструкции. Низкая стоимость компонентов. Возможность интеграции в существующие пневмосистемы	Низкая энергоемкость. Высокий уровень шума при работе. Необходимость дополнительного пространства для баллонов. Ограниченное применение в легковых авто
С использованием суперконденсатора	Энергия торможения преобразуется в электрическую и накапливается в электрохимических конденсаторах, которые заряжаются и разряжаются с очень высокой скоростью	Крайне высокая мощность, скорость рекуперации, долговечность. Эффективен при частых и резких торможениях	Низкая энергетическая плотность. Высокая стоимость. Обычно требуются в паре с аккумулятором

Данные системы принципиально различаются по способу преобразования кинетической энергии движения в полезную форму, и каждая из них обладает уникальным сочетанием эксплуатационных свойств и экономических показателей [1-15].

Использование обратимых электроприводов в качестве генераторов является наиболее перспективным и доминирующим направлением для рекуперации энергии торможения в легковых автомобилях. Это обусловлено высоким КПД (до 85 %), универсальностью и способностью мгновенно переключаться между режимами двигателя и генератора, обеспечивая плавное и эффективное торможение автомобиля. Данная технология является критически важной частью электромобилей и гибридов, так как напрямую увеличивает запас хода на 15-30 %, продлевает ресурс батареи. Кроме того, электрическая рекуперация эффективно встраивается в интеллектуальные системы управления и автономного вождения, где алгоритмы на основе искусственного интеллекта оптимизируют ее в реальном времени, а также приносит дополнительные преимущества в виде значительного снижения износа фрикционных тормозов, что сокращает затраты на обслуживание и уменьшает вредные выбросы от продуктов износа [5, 6].

Современный легковой автомобиль с системой рекуперативного торможения представляет собой интегрированную электромеханическую систему, ключевыми компонентами которой являются: тяговый электродвигатель (генератор) двойного назначения, выполняющий функции, как привода, так и генератора; высоковольтная тяговая батарея, служащая накопителем энергии; инвертор-преобразователь, осуществляющий двунаправленное преобразование постоянного и переменного тока; система управления энергией, координирующая работу всех компонентов и интегрированная тормозная система,

обеспечивающая совместную работу рекуперативных и гидравлических тормозных механизмов. Принцип работы основан на реверсивном функционировании электродвигателя: при торможении система переводит его в генераторный режим, преобразуя кинетическую энергию вращающихся колес в электрическую благодаря тормозному моменту на валу. Выработанная электроэнергия через инвертор поступает в тяговую батарею, а интеллектуальная система управления обеспечивает оптимальное распределение тормозного усилия между рекуперативной и гидравлической составляющими, гарантируя эффективное восстановление энергии при сохранении привычных для водителя характеристик торможения [7, 8].

Для предварительного исследования такой системы рекуперативного торможения разработана математическая модель легкового автомобиля с электрической трансмиссией. Модель включает электромеханическую систему рекуперации на основе синхронного мотор-генератора с постоянными магнитами, интегрированного в трансмиссию, с пиковой мощностью рекуперации 60-80 кВт и литий-ионной тяговой батареей номинальным напряжением 350-400 В. Конструкция предусматривает электрогидравлическую тормозную систему с интеллектуальным распределением тормозного усилия между рекуперативной и фрикционной составляющими в пропорции 70-90 % на рекуперацию и 10-30 % на фрикционные механизмы. Модель учитывает аэродинамические параметры автомобиля (лобовая площадь 2,1 м², коэффициент аэродинамического сопротивления $C_d = 0,28$), массовые характеристики (полная масса 1800-2000 кг) и тепловые ограничения компонентов. Рабочий диапазон модели охватывает скорости 7,2-120 км/ч при допустимом уровне заряда батареи 20-95 % и максимальном замедлении до 8 м/с² [9-15].

Уравнение продольной динамики имеет следующий вид:

$$m \frac{dv}{dt} = F_{trac} - F_{brk} - F_{roll} - F_{aero} - F_{grade} - F_{rough}, \quad (1)$$

где m – масса автомобиля, кг; v – скорость, м/с; F_{trac} – сила тяги, Н; F_{brk} – суммарная тормозная сила, Н; F_{roll} – сила сопротивления качению, Н; F_{aero} – аэродинамическое сопротивление, Н; F_{grade} – сила сопротивления уклону, Н; F_{rough} – сила сопротивления неровностям покрытия, Н.

Сила сопротивления качению и аэродинамическое сопротивление рассчитываются по следующим зависимостям:

$$F_{roll} = c_r \cdot m \cdot g \cdot \cos(\theta), \quad F_{aero} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2, \quad (2)$$

где c_r – коэффициент сопротивления качению; $g = 9,81$ м/с²; θ – угол продольного уклона дороги, рад; ρ – плотность воздуха, кг/м³; C_d – коэффициент аэродинамического сопротивления; A – лобовая площадь, м².

Сопротивление уклону и сопротивление неровностям покрытия определяют в соответствии с зависимостями:

$$F_{grade} = m \cdot g \cdot \sin(\theta), \quad F_{rough} = k_h \cdot \frac{dh}{dx} \cdot v, \quad (3)$$

где k_h – коэффициент влияния неровностей, Н · с/м²; $\frac{dh}{dx}$ – градиент высоты неровностей.

Тормозная сила распределяется между фрикционной и рекуперативной системами:

$$F_{brk} = F_{fric} + F_{rec}, \quad (4)$$

где F_{fric} – механическая тормозная сила; F_{rec} – рекуперативная составляющая тормозной силы, Н.

Рекуперативная составляющая тормозной силы ограничена по мощности и требуемому замедлению:

$$F_{rec} = \min \left(\frac{P_{max}^{rec}}{v}, m \cdot a_{brk} \cdot k_{rec} \right), \quad (5)$$

где P_{max}^{rec} – максимальная мощность рекуперации, Вт; a_{brk} – целевое замедление, м/с²; k_{rec} – коэффициент использования рекуперации ($0 \leq k_{rec} \leq 1$).

Мгновенная рекуперативная мощность рассчитывается по следующей зависимости:

$$P_{rec} = \begin{cases} \eta_{rec} \cdot F_{rec} \cdot v \cdot f_{speed} \cdot f_{rough}, \\ 0, \end{cases} \quad (6)$$

где f_{speed} – коэффициент влияния скорости; f_{rough} – коэффициент влияния неровностей.

Накопленная за время поездки рекуперированная энергия определялась по зависимости:

$$E_{rec} = \int P_{rec} dt. \quad (7)$$

Скорректированный расход топлива с учетом рекуперации:

$$Q_{total} = Q_{base} + \frac{E_{drive} - \eta_{sys} \cdot E_{rec}}{L_{hv} \cdot \eta_{eng} \cdot 100}, \quad (8)$$

где Q_{base} – базовый расход топлива, л/100 км; E_{drive} – энергия, затрачиваемая на движение за цикл, Дж; η_{sys} – общий КПД системы рекуперации (0,7-0,85); L_{hv} – низшая теплота сгорания топлива, Дж/л; η_{eng} – КПД двигателя внутреннего сгорания (0,3-0,4).

Коэффициент рекуперации определялся по зависимости:

$$\eta_E = \frac{E_{rec}}{E_{brk}} \cdot 100 \%, \quad (9)$$

где E_{brk} – общая энергия торможения за цикл, Дж.

Относительная экономия топлива определялась по зависимости:

$$\Delta Q = \frac{Q_{ref} - Q_{total}}{Q_{ref}} \cdot 100 \%, \quad (10)$$

где Q_{ref} – расход топлива в отсутствие системы рекуперации, л/100 км.

Математическая модель решалась с использованием комбинации аналитических методов и численного интегрирования. Основное дифференциальное уравнение движения решалось методом Рунге-Кутты 4-го порядка с шагом в диапазоне 0,01-0,1 с в зависимости от скорости изменения переменных состояния. При этом модель основана на допущениях о постоянстве КПД системы (75 %), медленном изменении параметров процессов, линейности характеристик электродвигателя, независимости параметров от температуры в рабочем диапазоне, и статистической однородности дорожного покрытия. Принято допущение о мгновенном переключении между режимами двигателя и генератора, а также о постоянстве коэффициентов сопротивления движению. Модель имеет ограничения по скоростному диапазону (7,2-120 км/ч), уровню заряда батареи (20-95 %), максимальному замедлению (6 м/с²) и температурным условиям (–20 ... +50°C). Игнорируются переходные электромеханические процессы, влияние атмосферного давления, деградация характеристик аккумулятора, изменение массы автомобиля от расхода топлива и поперечная динамика транспортного средства.

В ходе исследования варьировались ключевые параметры в следующих диапазонах: кинематические характеристики включали скорость движения 10-120 км/ч, замедление 1-6 м/с² и частоту торможений 0,1-3 циклов/мин; геометрические параметры охватывали массу автомобиля 1000-2500 кг, уклон дороги ± 8 % и коэффициент неровности 0-1; энергетические характеристики включали мощность рекуперации 0-60 кВт, КПД системы 0,7-0,85 и базовый расход топлива 6,5-9 л/100 км; временные параметры состояли из общего времени моделирования 3600 с и шага дискретизации 0,01-1 с.

График зависимости (рис. 1, а) показывает линейную зависимость суммарной рекуперлируемой энергии от частоты торможений. Каждое дополнительное торможение вносит вклад в общий объем восстановленной энергии. Такая характеристика объясняет высокую эффективность рекуперативных систем в городских условиях движения, где частое торможение является неотъемлемой частью эксплуатационного цикла. На графике зависимости (рис. 1, б) наблюдается монотонный рост рекуперлируемой мощности с увеличением массы автомобиля, что объясняется прямой зависимостью кинетической энергии от массы.

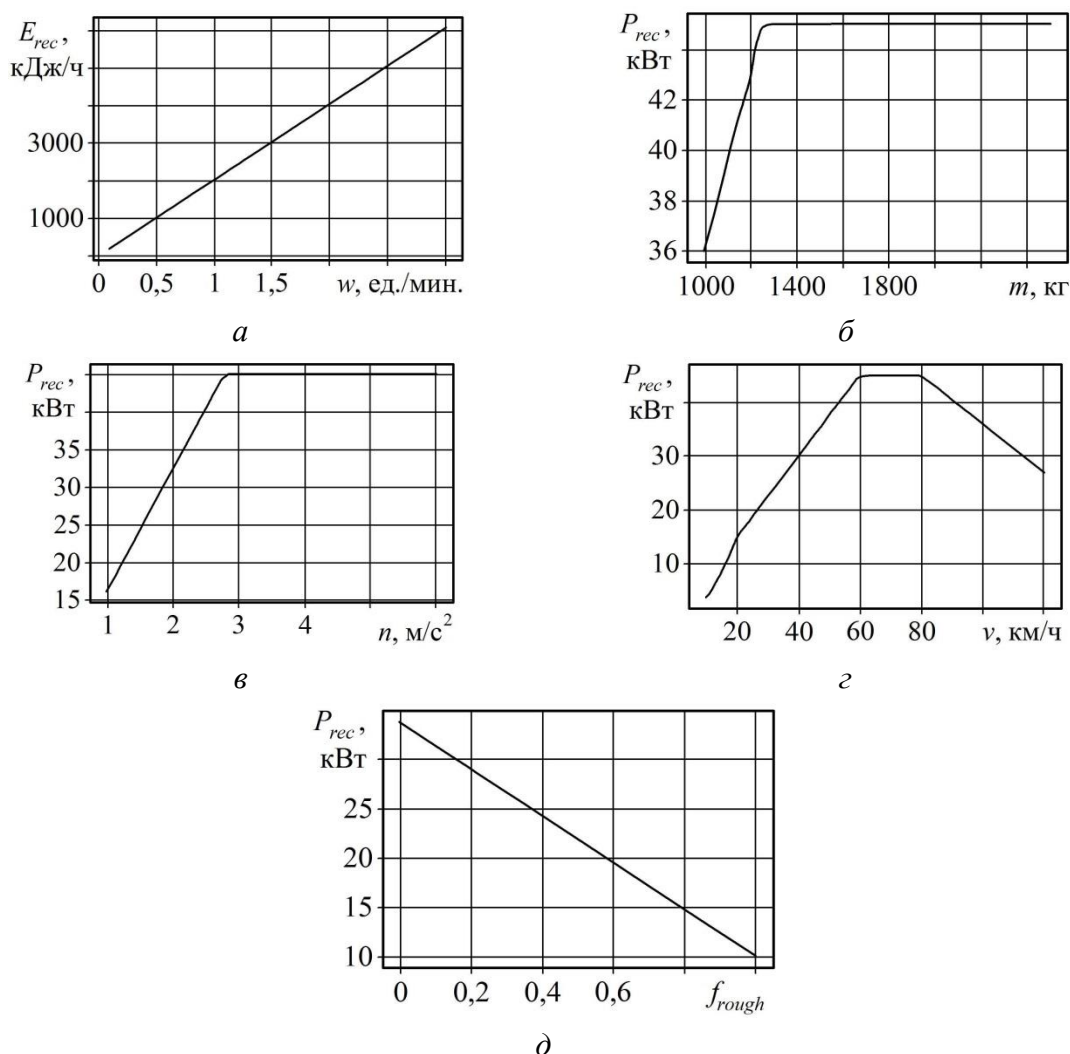


Рисунок 1 – Графики зависимостей рекуперлируемой мощности от частоты торможений – а, массы автомобиля – б, интенсивности торможений – в, скорости движения – г, неровности дороги – д

Figure 1 – Graphs of the dependence of recuperated power on the frequency of braking – а, vehicle weight – б, braking intensity – в, driving speed – г, road roughness – е

Более тяжелые автомобили при одинаковой скорости обладают большим запасом кинетической энергии, которая может быть преобразована в электрическую при торможении. Однако после достижения массы 1800-2000 кг рост мощности замедляется, что свидетельствует о выходе на пределы мощности электрогенератора системы рекуперации. Это указывает на наличие технических ограничений, которые не позволяют бесконечно увеличивать эффективность рекуперации при росте массы транспортного средства.

На графике (рис. 1, в) виден нелинейный рост мощности рекуперации с увеличением интенсивности торможения. На начальном участке ($1-4 \text{ м/с}^2$) наблюдается быстрый рост, обусловленный увеличением тормозного усилия, преобразуемого в электрическую мощность. При дальнейшем увеличении замедления ($> 5 \text{ м/с}^2$) достигаются предельные возможности генератора по преобразованию механической энергии в электрическую. Это ограничение связано с конструктивными особенностями и тепловыми режимами работы электрооборудования. Анализ графика (рис. 1, г) показывает, что на малых скоростях ($< 20 \text{ км/ч}$) мощность рекуперации незначительна из-за недостаточного запаса кинетической энергии. При скоростях 40-80 км/ч система работает в оптимальном режиме, эффективно

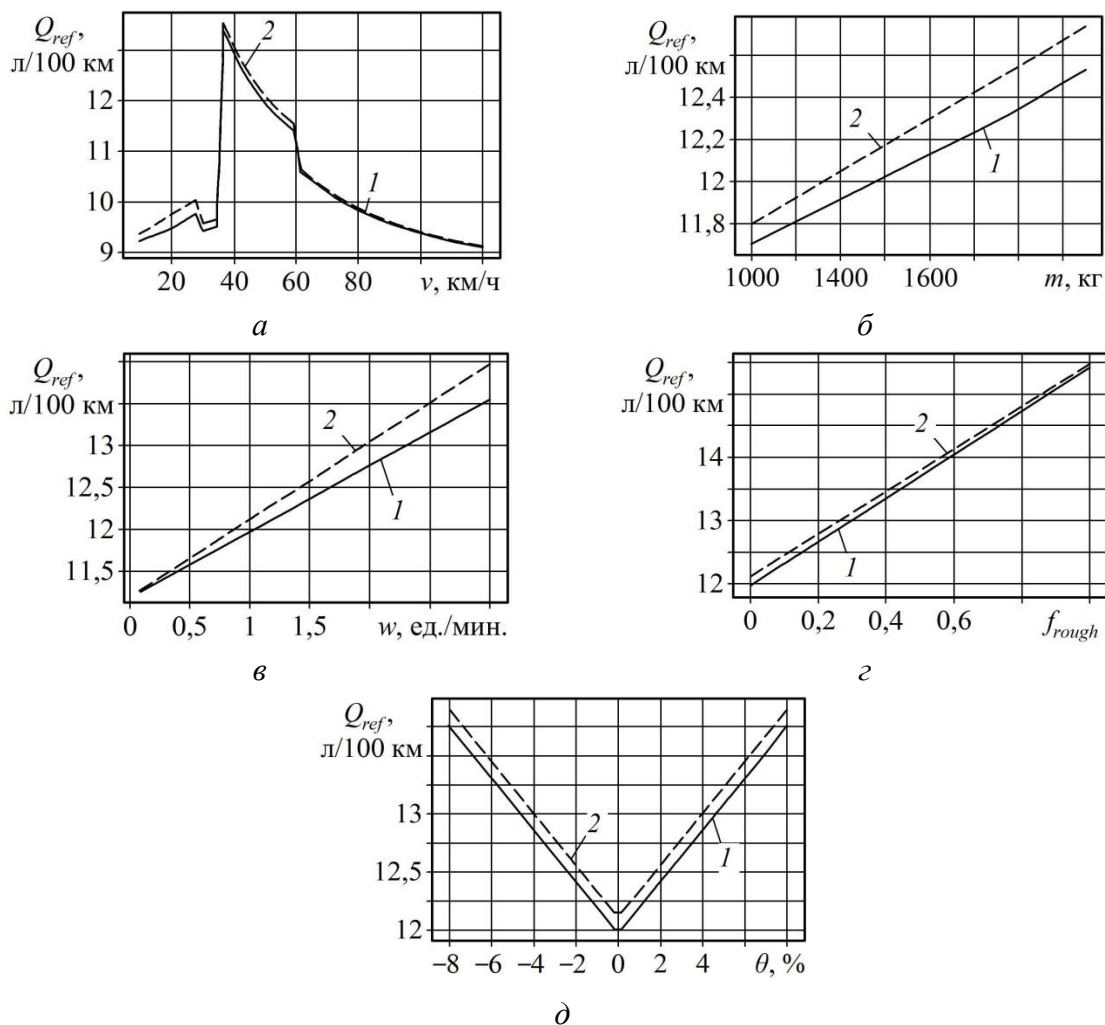
преобразуя кинетическую энергию. Снижение мощности при высоких скоростях ($> 100 \text{ км/ч}$) объясняется ограничениями по мощности генератора и необходимостью обеспечения безопасного торможения, что требует подключения традиционной тормозной системы.

На графике (рис. 1, д) наблюдается монотонное уменьшение рекуперированной мощности с ростом коэффициента неровности дороги. Это связано с нарушением стабильного контакта колес с дорожной поверхностью, что приводит к нерегулярному характеру торможения и необходимости более частого использования механических тормозов. На сильно неровных дорогах система рекуперации теряет до 70 % эффективности, поскольку значительная часть энергии расходуется на преодоление неровностей и гашение колебаний подвески.

График (рис. 2, а) показывает, что максимальная экономия (25-30 %) наблюдается в городском диапазоне скоростей (30-60 км/ч), где частота торможений наиболее высока. На высоких скоростях ($> 90 \text{ км/ч}$) разница сокращается до 5-10 %, что объясняется редким использованием торможения и преобладанием аэродинамического сопротивления. Это подтверждает целесообразность применения рекуперации преимущественно для городского цикла эксплуатации. На графике (рис. 2, б) видна линейная зависимость расхода топлива от массы для обоих типов автомобилей, причем угол наклона линий практически идентичен. Это свидетельствует о том, что относительная экономия топлива (20-25 %) сохраняется постоянной независимо от массы транспортного средства. Однако абсолютная экономия топлива возрастает с увеличением массы, поскольку тяжелые автомобили обладают большей кинетической энергией, являющейся потенциальной для рекуперации.

График (рис. 2, в) показывает, что с ростом частоты торможений разница в расходе топлива между автомобилями с рекуперацией и без нее увеличивается. При частоте торможений более 2 раз в минуту экономия достигает 35 %. На участке редких торможений ($< 0,5 \text{ ед./мин}$) преимущество рекуперации минимально, поскольку энергия торможения составляет незначительную долю общих энергозатрат. На графике (рис. 2, г) наблюдается рост расхода топлива с увеличением неровности дороги для обоих типов автомобилей, однако автомобиль с рекуперацией сохраняет преимущество на всем диапазоне исследуемых параметров.

Даже при максимальных неровностях экономия составляет 15-20 %, что свидетельствует о сохранении работоспособности системы в сложных дорожных условиях.



1 – с рекуперацией энергии; 2 – без рекуперации энергии

Рисунок 2 – Графики зависимостей расхода топлива от скорости движения – а, массы автомобиля – б, частоты торможений – в, неровности дороги – г, уклона дороги – д

1 – with energy recovery; 2 – without energy recovery

Figure 2 – Graphs of fuel consumption versus vehicle speed – а, vehicle weight – б, braking frequency – в, road roughness – г, and road slope – д

Ухудшение эффективности объясняется необходимостью более частого использования механических тормозов и дополнительными энергозатратами на преодоление неровностей. График (рис. 2, д) демонстрирует асимметричную зависимость расхода топлива от уклона дороги. На спусках автомобиль с рекуперацией показывает максимальную экономию (до 40 %), поскольку система не только экономит топливо, но и аккумулирует энергию для последующего использования. На подъемах разница между системами минимальна, так как преобладает энергия, затрачиваемая на преодоление подъема.

Выполненное исследование позволило установить, что:

- системы рекуперативного торможения демонстрируют максимальную эффективность (экономию топлива 25-30 %) в городских условиях эксплуатации, характеризующихся частыми циклами разгона и торможения на скоростях 30-60 км/ч, в то время как на трассовых режимах с преобладанием аэродинамического сопротивления их вклад в экономию существенно снижается (до 5-10 %);

- эффективность рекуперации напрямую зависит от кинетической энергии

транспортного средства, что подтверждается линейным ростом рекуперированной мощности с увеличением его массы и частоты торможений, однако эта зависимость имеет нелинейный характер и ограничивается техническими параметрами системы, такими как пиковая мощность генератора и тепловые режимы;

– электрический тип системы рекуперации на основе мотор-генератора обладает наилучшими показателями благодаря высокому КПД (70-85 %) и оптимальному сочетанию эксплуатационных характеристик, что обуславливает перспективность его использования в современных электромобилях, в отличие от механических, гидравлических и пневматических систем, обладающих в совокупности существенными конструктивными и эксплуатационными недостатками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Armenta-Deu C., Cortes H. Analysis of kinetic energy recovery systems in electric vehicles. *Vehicles* 2023, 5, 387-403. <https://doi.org/10.3390/vehicles5020022>.
2. Alberto Boretti Perspective on compressed CO₂ regenerative braking systems for passenger cars. *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy* 12 (2025) 100970. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2025.100970>.
3. Alireza Azarm, Mohsen Esfahanian, Hosein Hamidi Rad development of an innovative flywheel-based brake energy recovery system for enhanced urban fuel efficiency in passenger cars. *Automotive Science and Engineering*, Vol. 14, № 2, (2024), 4388-4406. <https://doi.org/10.22068/ase.2024.671>.
4. Jinghan Guo, Jinqing Zhou Comprehensive analysis of braking energy recovery system for new energy vehicle. *Highlights in Science, Engineering and Technology MSMEE 2023*, Vol. 43 (2023). – Pp. 504-511.
5. Zuyi Lin, Tong Mo, Tianyi Wang Research and analysis on brake energy recovery of pure electric vehicles. *E3S Web of Conferences* 424, 01007 (2023) ICREE 2023. – 5 p. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342401007>.
6. Szumska E. M., Jurecki R. The analysis of energy recovered during the braking of an electric vehicle in different driving conditions. *Energies* 2022, 15, 9369. <https://doi.org/10.3390/en15249369>.
7. Szumska E. M. Regenerative braking systems in electric vehicles: a comprehensive review of design, control strategies, and efficiency challenges. *Energies* 2025, 18, 2422. <https://doi.org/10.3390/en18102422>.
8. Mirosław Wendeker, Michał Gęcał, Łukasz Grabowski, Grzegorz Barański Measuring regenerative braking electricity generated by the city bus with internal combustion engine. *Advances in Science and Technology Research Journal* 2021, 15(3), 215-223. <https://doi.org/10.12913/22998624/140787>.
9. Sollicet G. Le, Chasse A., Van-Frank J., Walser D. Dual mode vehicle with in-wheel motor: regenerative braking optimization. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles*. 2011 – 14 p. DOI : 10.2516/ogst/2012013.
10. Emilia M. Szumska, Adriana Skuza, Rafał Jurecki The analysis of energy recovered by an electric vehicle during selected braking manoeuvres. *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji* Vol. 99, № 1, 2023. – Pp. 18-29. <https://doi.org/10.14669/AM/162079>.
11. Posmetev, V. I. Results of Computer Simulation of a Braking Vehicle Energy Recovery System / V. I. Posmetev, V. O. Nikonov, V. V. Posmetev // 6-th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020) : Conference proceedings, Sochi, Russia, 2020. – Sochi, Russia : Springer International Publishing, 2021. – P. 652-661. – DOI 10.1007/978-3-030-54817-9_75.
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019611251 РФ. Программа для моделирования движения лесовозного автомобиля с накопителями энергии в гидромоторах колес : № 2019610101 : заявл. 10.01.2019 : опубл. 23.01.2019 / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев ; заявитель ФГБОУ ВО «ВГЛУ им. Г.Ф. Морозова».
13. Посметьев, В. И. Теоретические обоснования новых технических решений, обеспечивающих повышение эксплуатационных свойств лесовозных автомобилей / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова, 2024. – 275 с.
14. Никонов, В. О. Оценка эффективности лесовозного автопоезда с накопителями энергии в

гидромоторах колес на основе компьютерного моделирования / В. О. Никонов, В. И. Посметьев, В. В. Посметьев // Мир транспорта и технологических машин. – 2018. – № 3(62). – С. 46-54.

15. Никонов, В. О. Состояние проблемы и обзор конструкций транспортных средств с системами рекуперации энергии торможения / В. О. Никонов, В. И. Посметьев и др. // Воронежский научно-технический Вестник. – 2018. – Т. 2, № 2(24). – С. 4-19.

REFERENCES

1. Armenta-Deu C., Cortes H. Analysis of kinetic energy recovery systems in electric vehicles. *Vehicles* 2023, 5, 387-403. <https://doi.org/10.3390/vehicles5020022>.

2. Alberto Boretti Perspective on compressed CO₂ regenerative braking systems for passenger cars. *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy* 12 (2025) 100970. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2025.100970>.

3. Alireza Azarm, Mohsen Esfahanian, Hosein Hamidi Rad development of an innovative flywheel-based brake energy recovery system for enhanced urban fuel efficiency in passenger cars. *Automotive Science and Engineering*, Vol. 14, № 2, (2024), 4388-4406. <https://doi.org/10.22068/ase.2024.671>.

4. Jinghan Guo, Jinqing Zhou Comprehensive analysis of braking energy recovery system for new energy vehicle. *Highlights in Science, Engineering and Technology MSMEE* 2023, Vol. 43 (2023). – Pp. 504-511.

5. Zuyi Lin, Tong Mo, Tianyi Wang Research and analysis on brake energy recovery of pure electric vehicles. *E3S Web of Conferences* 424, 01007 (2023) ICREE 2023. – 5 p. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342401007>.

6. Szumska E. M., Jurecki R. The analysis of energy recovered during the braking of an electric vehicle in different driving conditions. *Energies* 2022, 15, 9369. <https://doi.org/10.3390/en15249369>.

7. Szumska E. M. Regenerative braking systems in electric vehicles: a comprehensive review of design, control strategies, and efficiency challenges. *Energies* 2025, 18, 2422. <https://doi.org/10.3390/en18102422>.

8. Mirosław Wendeker, Michał Gęcał, Łukasz Grabowski, Grzegorz Barański Measuring regenerative braking electricity generated by the city bus with internal combustion engine. *Advances in Science and Technology Research Journal* 2021, 15(3), 215-223. <https://doi.org/10.12913/22998624/140787>.

9. Sollicet G. Le, Chasse A., Van-Frank J., Walser D. Dual mode vehicle with in-wheel motor: regenerative braking optimization. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles*. 2011 – 14 p. DOI : 10.2516/ogst/2012013.

10. Emikia M. Szumska, Adriana Skuza, Rafał Jurecki The analysis of energy recovered by an electric vehicle during selected braking manoeuvres. *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji* Vol. 99, № 1, 2023. – Pp. 18-29. <https://doi.org/10.14669/AM/162079>.

11. Posmetev, V. I. Results of Computer Simulation of a Braking Vehicle Energy Recovery System / V. I. Posmetev, V. O. Nikonov, V. V. Posmetev // 6-th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020) : Conference proceedings, Sochi, Russia, 2020. – Sochi, Russia : Springer International Publishing, 2021. – P. 652-661. – DOI 10.1007/978-3-030-54817-9_75.

12. Certificate of state registration of computer program № 2019611251 of the Russian Federation. Program for modeling the motion of a logging vehicle with energy storage devices in wheel hydraulic motors : № 2019610101 : declared 10.01.2019 : published 23.01.2019 / V. I. Posmetyev, V. O. Nikonov, V. V. Posmetyev; applicant FSBEI HE «VSTU named after G. F. Morozov».

13. Posmetyev, V. I. Theoretical justification for new technical solutions ensuring improved performance properties of logging vehicles / V. I. Posmetyev, V. O. Nikonov, V. V. Posmetyev. – Voronezh : Voronezh State Forest Engineering University named after G. F. Morozo, 2024. – 275 p.

14. Nikonov, V. O. Evaluation of the efficiency of a logging road train with energy storage systems in wheel hydraulic motors based on computer simulation / V. O. Nikonov, V. I. Posmetyev, V. V. Posmetyev // *The World of Transport and Technological Machines*. – 2018. – № 3 (62). – P. 46-54.

15. Nikonov, V. O. State of the problem and review of vehicle designs with brake energy recovery systems / V. O. Nikonov, V. I. Posmetyev, et al. // *Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. – 2018. – Vol. 2, № 2 (24). – P. 4-19.