УДК 629.331
2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта




В.А. Раков, А.В. Востров
Вологодский государственный университет

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ ГИБРИДНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

В работе рассматривается проблема отсутствия единого подхода к оценке эффективности рекуперативного торможения гибридных автомобилей. Приводятся возможные критерии оценки, а также влияющие факторы. Приведены результаты экспериментальной оценки, полученные при торможении с разной интенсивностью. Приведенные подходы показывают, что при рекуперативном торможении в накопитель возвращается 60 % от всей энергии торможения автомобиля с начальной скорости 57 км/ч до полной остановки.

Рекуперация, оценка эффективности, КПД, методика измерения, влияющие факторы.

Рекуперативное торможение – это одно из преимуществ электрического привода в транспортных машинах, включая автомобильный транспорт. Благодаря ему удается вернуть часть кинетической энергии, приобретенной транспортным средством во время разгона. Свойства рекуперативного торможения известны достаточно давно, но наибольшее распространение получили лишь в последнее время благодаря развитию накопителей электрической энергии. Исследование эффективности рекуперации и влияние ее на экономичность транспортного средства – это вопросы, связанные с необходимостью проведений весьма сложных измерений, разработками методического обеспечения и концептуальных научных подходов к оценочным свойствам. Поэтому эти вопросы всегда лежали в плоскости науки и инженерных разработок. Теоретические вопросы, связанные с рекуперацией, обсуждались в статьях С.Б. Аджиманбетова [1], И.К. Александрова [2–3], И.М. Рябова [4], Ю.М. Инькова [5], С.А. Иванова [6]. Математическое моделирование процессов рекуперации было рассмотрено авторами в статьях Ракова В.А. [7–9]. Практические вопросы исследования эффективности обсуждались в статьях В.Я. Двадненко [10] В.А. Ракова [11–13], M. Khodaparastan [14], О.Н. Дидманидзе [15].

В России имеются стандарты на оценку эффективности рекуперации для электромотоциклов [16] и для железнодорожного транспорта [17].

Так, в п. В.2.6 эффективность рекуперации (Regenerative Efficiency) определяется как отношение рекуперированной энергии к поставляемой энергии.

На практике это означает, что требуется измерить расход энергии при разгоне и затем при торможении. Для электрического транспортного средства, снабженного накопителем энергии, сделать это несложно, однако для гибридного, в котором часть энергии поставляется двигателем внутреннего сгорания, а часть – электрическим двигателем, весьма непросто. Также требуется уточнить, что иногда необходимо оценивать электропривод, машину в целом или снижение энергопотребления.

Ввиду того, что для гибридных автомобилей не определен критерий оценки эффективности рекуперации, в работах автора Ракова В.А. приводятся разные подходы оценки эффективности рекуперации [11].

На основании произведенных лабораторных исследований описано понятие «коэффициент возврата энергии при рекуперации» (КР), характеризующий эффективность рекуперативного торможения и дополняющий понятие «эффективность рекуперации». При этом коэффициент КР1 характеризует отношение энергии, возвращенной в накопитель при рекуперации, по отношению к энергии, затраченной на разгон автомобиля до начальной скорости. Этот коэффициент оценивает степень влияния рекуперации на топливную экономичность автомобиля.

Коэффициент КР2 характеризует отношение энергии, возвращенной в накопитель, по отношению к кинетической энергии движущегося автомобиля. КР2 показывает качества преобразования и накопления энергии в накопитель.

Помимо этого, существуют факторы, влияющие на эффективность рекуперации, такие как: максимальная мощность системы электропривода, максимальный ток заряда накопителей энергии, текущий уровень заряда накопителей, факторы торможения (начальная скорость торможения, замедление, время остановки), масса транспортного средства.

Для оценки влияния интенсивности торможения на эффективность рекуперации проведены испытания на гибридном автомобиле Toyota Prius 30. Масса автомобиля с пассажирами 1800 кг, начальная скорость торможения 57 км/ч. Температура воздуха +15 ºС, покрытие асфальт. Для исключения уклона движение в разных направлениях.

В процессе торможения записывались: время, сила тока и напряжение в батарее, скорость автомобиля. По формуле вычислялась мощность и энергия при ре-

куперации. Показателем оценки являлась возвращенная при торможении энергия.

$$W_{\text{ВОЗ}} = \sum_{1}^{n} W_{PEKi} \,, \qquad (1)$$

где W_{PEKi} – электрическая энергия в каждой точке.

$$W_{\text{PEKi}} = P \times \Delta t = I \times U \times \Delta t \,, \qquad (2)$$

где Δt – i-й интервал времени, I, U, P – сила тока, напряжение и мощность в цепи аккумуляторной батареи.

Таблица 1

Результаты оценки возврата энергии в зависимости от интенсивности торможения

№ испытания	1	3	2	4
Время, с	31,9	22,5	13,9	9,9
Энергия ($W_{\text{ВОЗ}}$), кДж	163	140	170	140

Как следует из таблицы 1 и графика (рис. 1), энергия в накопителе при торможении менялась не значительно, т.е. интенсивность торможения в выбранном диапазоне замедлений почти не влияет на эффективность возврата энергии.

КПД возврата энергии равен отношению электрической мощности, возвращаемой в накопитель по отношению к мощности силы торможения автомобиля, вычисляется по формуле:

$$\eta_{\text{РЕК}} = \frac{N_{\text{РЕК}}}{N_{\text{Т}}} \times 100 \text{ , (%).} \qquad (3)$$

На графике (рис. 2) показано изменение КПД при торможении. Среднее значение $\eta_{\text{РЕК}}$ составляет 60,6 %.

Эффективность возврата энергии может быть вычислена и другим способом: исходя из кинетической энергии торможения. При этом коэффициент возврата энергии при рекуперации равен отношению возвращенной в накопитель энергии электрической мощности к кинетической энергии движущегося автомобиля:

$$\eta_{\text{ВОЗ}} = \frac{W_{\text{РЕК}}}{W_{\text{КИН}}} \times 100 \text{ , (%).} \qquad (4)$$

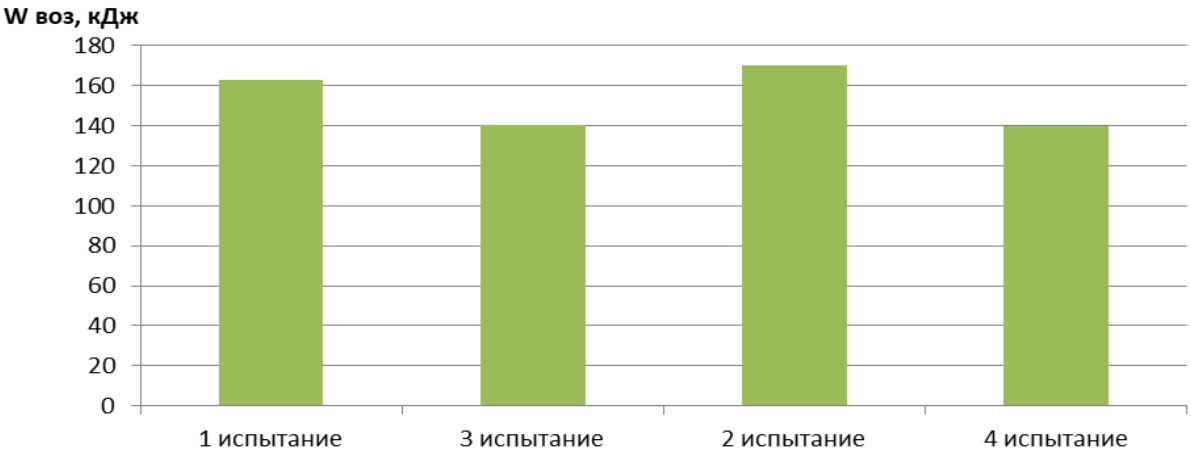


Рис. 1 .Сравнение возвращенной энергии при рекуперации с разной интенсивностью торможения

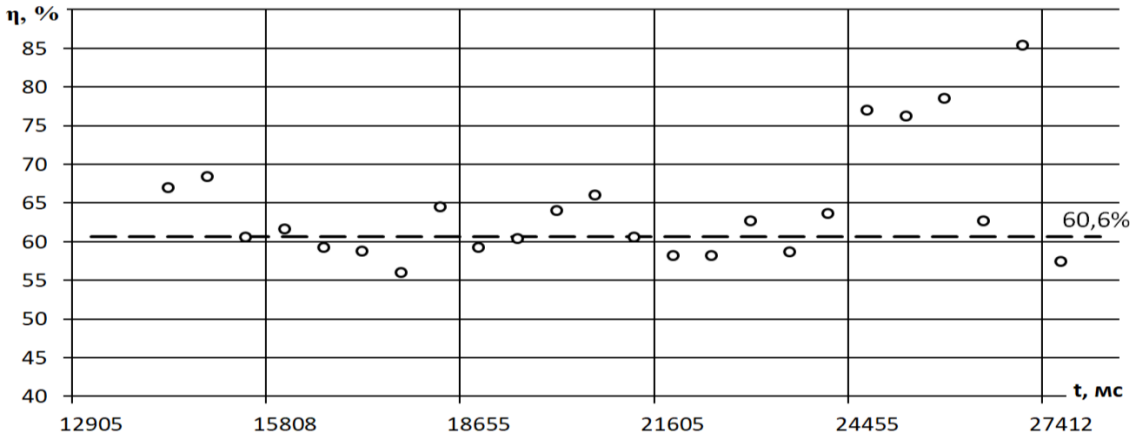


Рис. 2. Изменение КПД возврата энергии ($\eta_{ВОЗ}$) при рекуперации

Начальная кинетическая энергия движущегося автомобиля, как и любого движущегося тела, по теории физики равна:

$$W_{\text{КИН}} = \frac{M_A \times v^2}{2}, \text{ Дж}, \quad (5)$$

где масса автомобиля, кг, v – скорость, м/с.

Результаты оценки эффективности рекуперации по отношению к кинетической энергии движущегося автомобиля приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты оценки эффективности рекуперации по отношению к кинетической энергии движущегося автомобиля

№ испытания	**1**	**3**	**2**	**4**
Начальная энергия автомобиля (*W*кин), кДж	205,7			
Возвращенная энергия ($W_{\text{РЕК}}$), кДж	163	140	170	140
Коэффициент возврата энергии, %	79,2	68	82	68

Таким образом, приведенные результаты подтверждают возможность использования нескольких подходов к оценке эффективности рекуперации энергии торможения как электрических, так и гибридных автомобилей. Полученные значения эффективности рекуперации в целом сопоставимы с исследованиями, проведенными ранее (60 %) [11]. Значения эффективности рекуперации, приведенные другими авторами, отличаются, что может говорить об отсутствии единой методики оценки. Полученные результаты будут полезны при исследовании свойств рекуперативного торможения, при моделировании работы энергоустановок, а также при определении оптимальных режимов эксплуатации электромобилей или гибридных автомобилей.

В дальнейшей работе будут анализироваться и другие факторы, влияющие на эффективность рекуперативного торможения, такие как температура накопителя и остаточная энергия в батарее.

Литература

1. Аджиманбетов, С. Б. Оценка эффективности системы рекуперации гибридного автомобиля с вариатором / С. Б. Аджиманбетов, М. С. Льянов // В сборнике: Достижения науки – сельскому хозяйству. Материалы Всероссийской научно-практической конференции (заочной) . – 2017. – С. 278–280.

2. Александров, И. К. Адаптивные трансмиссии – путь к созданию экономичных машинных агрегатов и транспортных средств / И. К. Александров, Е. В. Несговоров, В. А. Раков // Техника в сельском хозяйстве. – 2011. – № 1. – С. 25–27.

3. Александров, И. К. Энергетический КПД машины с частичной рекуперацией / И. К. Александров // Вестник машиностроения. – 2007. – № 9. – С. 17–18.

4. Рябов, И. М. Проблемы создания системы рекуперации энергии торможения транспортных средств и пути их решения // И. М. Рябов, С. А. Ширяев, Ю. Г. Юсупов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2016. – С. 127–132.

5. In'kov, Y. M. Control of Recuperative Braking of a Locomotive under Limitation of the Energy Recovery to a Contact System / Y. M. In'kov, V. P. Feoktistov, O. V. Tretinnikov // Russian Electrical Engineering. – 2015. Vol. 86, № 9. – P. 509–513.

6. Иванов, С. А. Использование процессов рекуперативного торможения в гибридных электромобилях / С. А. Иванов, А. В. Фетисов. – Москва : ООО "УМЦ «Триада»", 2012. – 70 с.

7. Раков, В. А. Математическое моделирование рекуператоров тепловой энергии системы охлаждения ДВС / В. А. Раков // Автомобильная промышленность. – 2014. – № 11. – С. 7–9.

8. Rakov, V. Determination of Optimal Characteristics of Braking Energy Recovery System in Vehicles Operating in Urban Conditions / V. Rakov // Transportation Research Procedia : 14 (Saint Petersburg, 21–24 октября 2020 г.). – Saint Petersburg, 2020. – P. 566–573.

9. Раков, В. А. Исследование характеристик рекуперативного торможения автотранспортных средств / В. А. Раков // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. – 2020. – Т. 19, № 5. – С. 220–224.

10. Двадненко, В. Я. Исследование эффективности рекуперативного торможения гибридного автомобиля / В. Я. Двадненко // Автомобиле- и тракторостроение : Материалы Международной научно-практической конференции. – Т.2. – 2018. – С. 12–15.

11. Раков, В. А. Методология комплексной оценки и обеспечения эффективности эксплуатации гибридных автомобилей : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Вологда, 2025. – 422 с.

12. Раков, В. А. Влияние рекуперации энергии торможения на выбросы твердых частиц от автотранспорта / В. А. Раков // Мир транспорта и технологических машин. – 2020. – 4 (71). – С. 61–69.

13. Раков, В. А. Экспериментальная оценка характеристик рекуперативного торможения / В. А. Раков // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производства: технология и надежность машин, приборов и оборудования : материалы XIV Международной научно-технической конференции (Вологда, 10 декабря 2019 г.). – Вологда : Вологодский государственный университет, 2020. – С. 413–420

14. Khodaparastan, M. Recuperation of Regenerative Braking Energy in Electric Rail Transit Systems / M. Khodaparastan, A.A. Mohamed, W. Brandauer // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – Vol. 20, № 8. – 2019. – P. 2831–2847.

15. Техническая эксплуатация автомобилей / О. Н. Дидманидзе, А. А. Солнцев, Д. Г. Асадов [и др.]. – Москва : Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических иссле-

дований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2017. – 564 с.

16. ГОСТ Р 70917 – 2023. Мопеды и мотоциклы с электрическим приводом. Метод испытаний для оценки эффективности систем рекуперативного торможения. – Текст : электронный // Техэксперт : информационно-справочная система / Консорциум «Кодекс» (дата обращения: 05.04.2026). – Режим доступа : для авториз. пользователей.

17. Транспорт железнодорожный. Состав подвижной / энергообеспечение бортовыми системами накопления энергии / Часть 1 / Последовательные гибридные системы ГОСТ Р МЭК 62864-1-2021. – Текст : электронный // Техэксперт : информационно-справочная система / Консорциум «Кодекс» (дата обращения: 05.04.2026). – Режим доступа : для авториз. пользователей.

V.A. Rakov, A.V. Vostrov
Vologda State University

METHODOLOGY FOR EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF REGENERATIVE BRAKING EFFICIENCY IN HYBRID VEHICLES

This paper examines the lack of a unified approach to assessing the effectiveness of regenerative braking in hybrid vehicles. Potential evaluation criteria and influencing factors are presented. Experimental evaluation results obtained during braking at varying intensities are presented. These approaches demonstrate that regenerative braking returns 60 % of the vehicle's total braking energy from an initial speed of 57 km/h to a complete stop.

Recuperation, efficiency assessment, efficiency, measurement methodology, influencing factors.