УДК 629.113

МЕТОДИКА ВЫБОРА ТИПА И ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ ТОРМОЖЕНИЯ ДЛЯ МАРШРУТНОГО АВТОБУСА

Рябов И. М.*, Арсланов М. А.**, Юсупов Ю. Г.***, Минатуллаев Ш. М.**
*Волгоградский государственный технический университет
**Дагестанский государственный аграрный
университет имени Джамбулаева М. М.
***Махачкалинский филиал Московского автомобильно-дорожного
государственного технического университета
Email: rjabov1603@mail.ru

Методика выбора типа системы рекуперации энергии торможения (РЭТ) состоит из следующих этапов:

1) проводят эксперименты по торможению реальных автомобилей и по их результатам строят графики зависимости энергии, поглощаемой в тормозных механизмах автомобиля (рис. 1, кривая 2);

2) разрабатывают математические модели процесса торможения автомобиля, с помощью которых строят графики зависимости энергии, поглощаемой в накопителях различных систем РЭТ (рис. 1, кривые 1, 3 и 4);

3) выбирают тип системы рекуперации энергии торможения в результате анализа полученных результатов.

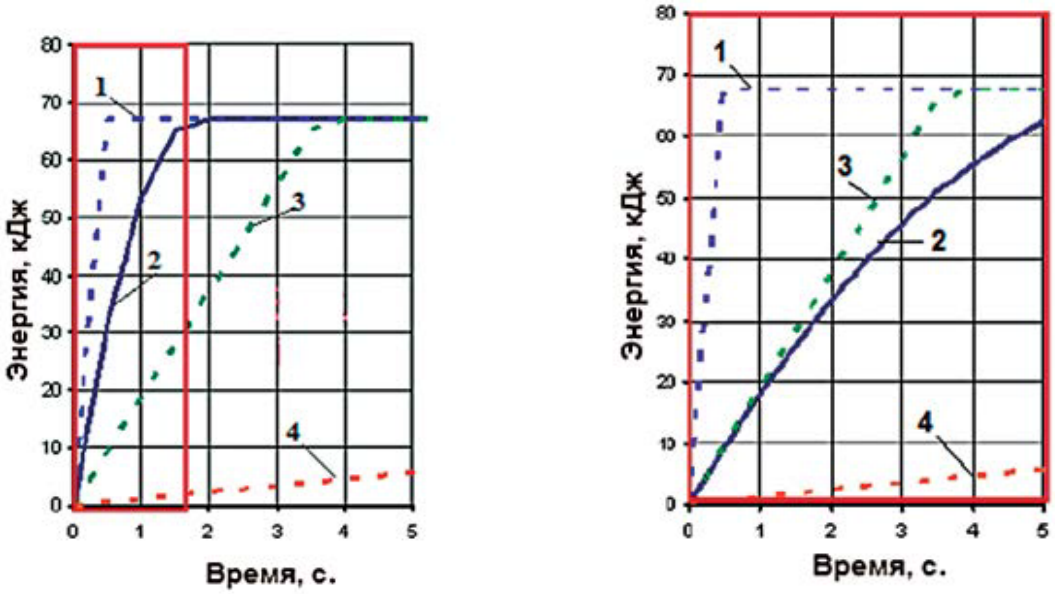
На рис. 1 представлены кривые, характеризующие изменение во времени энергии, поглощаемой тормозами при реальном торможении (кривая 2) грузового автомобиля массой 25 т, при торможении (*а*) и легкового автомобиля массой 1,5 т (*б*). Также представлены кривые, показывающие потенциально возможное изменение во времени энергии в накопителях различных систем РЭТ [1]:

– в пневмогидравлическом аккумуляторе (кривая 1);

– в Li-ion-накопителе (кривая 3);

– в батарее свинцово-кислотных аккумуляторов (кривая 4).

Анализ рисунка 1, *а* показывает, что только пневмогидравлический аккумулятор позволяет накапливать весь поток кинетической энергии тяжелого грузового автомобиля, поскольку только кривая 1 идет выше кривой 2. Li-ion-накопитель равной энергоёмкости успевает за время торможения накопить меньше половины кинетической энергии автомобиля (точка, в которой кривая 3 пересекает вертикаль, соответствующую времени торможения 1,7 с). В батарее



а *б*

кривая 1 – энергия, поглощаемая в пневмогидравлическом аккумуляторе; кривая 2 – энергия, поглощаемая в тормозных механизмах автомобиля; кривая 3 – энергия, поглощаемая в Li-ion-накопителе электрической системы РЭТ; кривая 4 – энергия, поглощаемая свинцово-кислотной батарее - накопителе электрической системы РЭТ

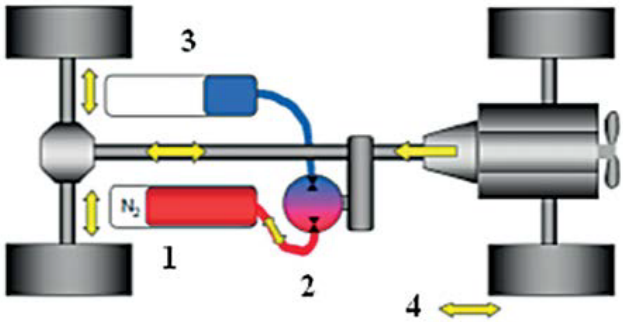
Рисунок 1 – Изменение во времени энергии, поглощаемой накопителями систем РЭТ различных типов, и тормозами при реальном торможении грузового автомобиля массой 25 т со скорости 10 км/ч за время 1,7 с и (*а*) и легкового автомобиля массой 1,5 т со скорости 50 км/ч за время 5 с. (*б*)

свинцово-кислотных аккумуляторов (кривая 4) за время торможения успевает накопиться не более 2 % кинетической энергии автомобиля.

Анализ рисунка 1, *б* показывает, что при плавном торможении лёгкового автомобиля (в течение 5 с) не только пневмогидравлический аккумулятор, но и Li-ion-накопитель, обеспечивает полное накопление его кинетической энергии, поскольку кривая 3 проходит выше кривой 2.

В работе [2] также отмечается, что для грузовых автомобилей, эксплуатируемых в городах, наилучшим образом подходят пнемогидравлические системы рекуперации энергии торможения, поскольку им требуется высокий уровень мощности в течение коротких промежутков времени.

Таким образом, только пневмогидравлический аккумулятор имеет очень высокую скорость заряда (и разряда) и позволяет накапливать весь поток кинетической энергии даже большого автобуса, что недостижимо для электрических накопителей. Это позволяет для маршрутного автобуса средней и большой вместимости выбрать пневмогидравлическую систему РЭТ (рис. 2).



1 – пневмогидравлический аккумулятор; *2* – насос-мотор;
3 – бак с гидравлической жидкостью; *4* – поток энергии

Рисунок 2 – Схема пневмогидравлической системы РЭТ

Основными элементами пневмогидравлической системы РЭТ (рис. 2) являются пневмогидравлический аккумулятор *1*, насос-мотор *2*; и бак с маслом *4*. Кроме того, она содержит устройство кондиционирования и очистки гидравлической жидкости, и систему управления. Можно выбрать гидравлический насос-мотор, шестеренчатого, аксиально-плунжерного, аксиально-поршневого или роликово-лопастного типа, но следует учитывать, что цена различных типов значительно отличается. В насосном режиме он преобразует энергию торможения автомобиля в потенциальную энергию давления, накапливаемую в аккумуляторе. В моторном режиме он преобразует потенциальную энергию сжатого газа, накопленную в аккумуляторе, в кинетическую энергию автомобиля в процессе разгона.

Методика выбора параметров основных элементов системы РЭТ для маршрутного автобуса состоит из следующих этапов:

1) проведение экспериментальных исследований на различных маршрутах и определение средней загрузки автобуса, скорости начала торможения и полной кинетической энергии автобуса;

2) оценка доли кинетической энергии автобуса, накапливаемой в аккумуляторе системы рекуперации при торможении и определение энергоемкости пневмогидравлического аккумулятора;

3) расчет крутящего момента и максимальной частоты вращения ведущей шестерни заднего моста, выбор насос-мотора и определение передаточного числа его привода с учетом среднего наполнения автобусов и оптимального для пассажиров замедления (1-2 м/с^2).

На первом этапе проведены исследования наполнения автобусов, проходящих через различные остановочные пункты, а также средней скорости начала торможения автобусов, результаты которых приведены на рисунках 3 и 4.

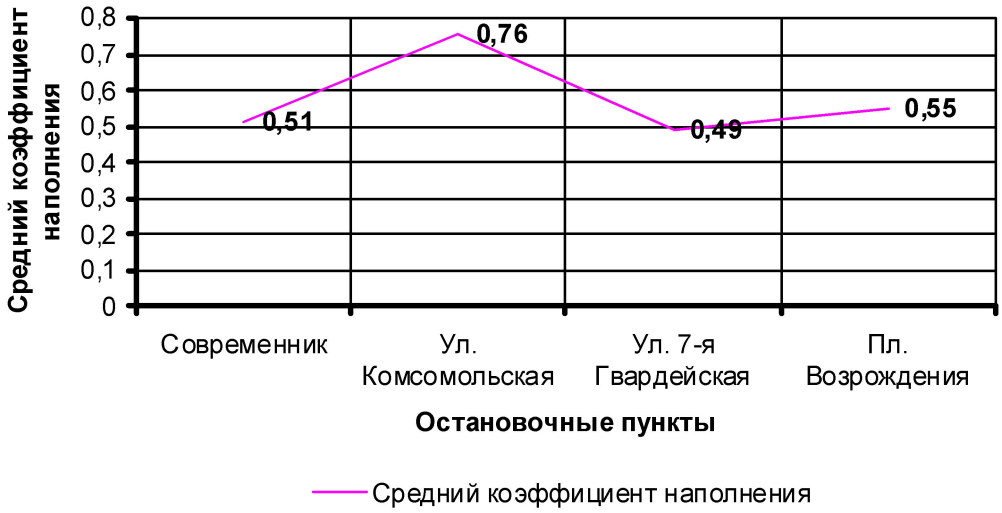


Рисунок 3 – Средний коэффициент наполнения салона автобусов, проходящих через различные остановочные пункты г. Волгограда

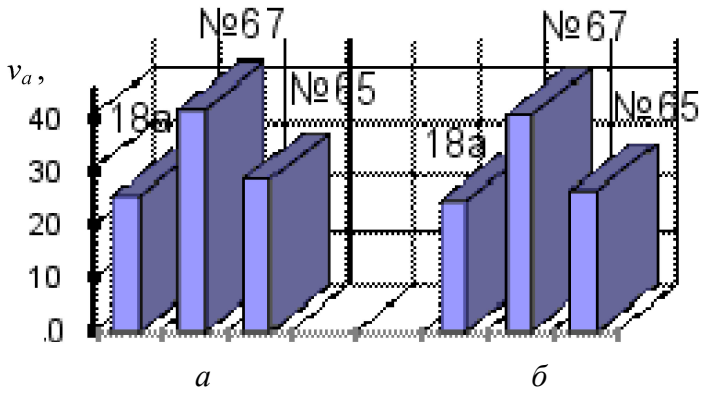


Рисунок 4 – Средняя скорость (в км/ч) начала торможения автобусов на трех маршрутах в выходные дни *а* и в будние дни *б*

Анализ данных рисунка 3 показывает, что средний коэффициент наполнения автобуса, позволяющий рассчитать его среднюю массу, равен 0,58.

$$m_a = m_{сн} + m_{пасс.}\, q_н\, \eta_{ср}, \qquad (1)$$

где m_a – средняя масса автобуса; $m_{пасс}$ – средняя масса пассажира; $\eta_{ср}$ – средний коэффициент наполнения автобуса.

Анализ данных рисунка 4 показывает, что средняя скорость начала торможения маршрутного автобуса на исследованных маршрутах равна 30,7 км/ч, в выходные и будние дни она отличается незначительно. При расчете энергоемкости аккумулятора системы РЭТ автобуса для снижения ее массы и стоимости следует принять равной скорость V = 30 км/ч. Тогда, полная кинетическая энергия автобуса

$$W_a = \frac{\delta_{вр} m_a \vartheta_a^2}{2}, \qquad (2)$$

где W_a – полная кинетическая энергия автобуса, Н·м; $\delta_{вр}$ – коэффициент, учитывающий влияние вращающихся масс трансмиссии и колес автобуса (при отключённом двигателе); m_a – масса автобуса, кг; ϑ_a – скорость автобуса в момент начала торможения, м/с;

На втором этапе проведена оценка доли кинетической энергии автобуса, накапливаемой в аккумуляторе системы рекуперации при торможении по формуле:

$$Д = W_н / W_a, \qquad (3)$$

где $W_н$ – кинетическая энергия, накапливаемая в аккумуляторе системы рекуперации при торможении.

Расчеты, выполненные для микроавтобуса «ГАЗель» показали, что при использовании в его системе РЭТ шестеренчатого насос-мотора с КПД 0,7 доля энергии, которая может накопиться в поршневом пневмогидравлическом аккумуляторе, составляет 60 % от кинетической энергии автобуса в момент начала торможения, а при использовании аксиально-поршневого насос-мотора, имеющего КПД 0,9 она достигает 80 %.

На третьем этапе для автобуса «ГАЗель» выбран шестеренчатый насос-мотор ГМШ 100 с мощностью до 33 кВт, массой 16,29 кг, КПД 0,7 и ценой 4998 р., и аксиально-поршневой насос-мотор 310.2.28.00.03 до 28,7 кВт, массой 9 кг, КПД 0,91 и ценой 17300 р.

Определено, что передаточное число привода насос-мотора ГМШ 100 равно двум, а привода аксиально-поршневого насос-мотора 310.2.28.00.03 равно трем. Для обеспечения требуемого момента на один автобус требуется два насос-мотора, позволяет сделать два диапазона интенсивности разгона и торможения. Расчеты показали, что система РЭТ с ГМШ 100 позволяет после полного торможения со скорости 30 км/ч разогнать автобус «ГАЗель» до скорости 18 км/ч, что позволяет продолжить движение на второй передаче. Система РЭТ с аксиально-поршневым насос-мотором 310.2.28.00.03 позволяет после полного торможения со скорости 40 км/ч разогнать автобус «ГАЗель» до скорости 32 км/ч, что позволяет продолжить движение на третьей передаче.

Таким образом, предложенная методика позволяет осуществить рацио-

нальный выбор типа системы РЭТ и параметров ее основных элементов для маршрутного автобуса с учетом условий эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Lindzus E. HRB – Hydrostatic Regenerative Braking System : The11th Scandinavian Internaional Conference on Fluid Power. – Sweden, 2009.

2 Hydraulic Hybrid Drive from Bosch Rexroth [Электронный ресурс].

3 Рябов, И. М. Системы рекуперации энергии торможения автомобиля на базе гидропневматического аккумулятора [Текст] / И. М. Рябов, А. М. Ковалев, К. В. Чернышов // Транспортные и транспортно-технологические системы : матер. междунар. науч.-техн. конф. (20 апр. 2011 г.) / ГОУ ВПО "Тюменский гос. нефтегаз. ун-т". – Тюмень, 2011. – С. 232–236.

4 Система рекуперации энергии торможения автомобиля на базе шариковинтовой передачи и гидропневмоаккумулятора [Текст] / А. М. Ковалев, Ю. Г. Юсупов, И. М. Рябов, К. В. Чернышов // XVI региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области, Волгоград, 8-11 ноября 2011 г. : тез. докл. / ВолгГТУ [и др.]. – Волгоград, 2012. – С. 61-63.

5 Системы рекуперации энергии торможения автомобиля на базе гидропневматического аккумулятора [Текст] / К. Д. Белоусов, С. Е. Мохов, И. М. Рябов, А. В. Куликов // Тезисы докладов смотра-конкурса научных, конструкторских и технологических работ студентов Волгоградского гос. технического университета, 14-17 мая 2013 г. / ВолгГТУ, Совет СНТО. – Волгоград, 2013. – С. 133-134.

6 Патент на полезную модель 103516 РФ, МПК B60K 6/12 Рекуператор [Текст] / И. М. Рябов, К. В. Чернышов, А. М. Ковалев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ВолгГТУ». – № 2010145103/11 ; заявл. 03.11.2010 ; опубл. 20.04.2011.

7 Гулиа Н. В. Накопители энергии [Текст]. – М. : Наука. 1980. – 151 с.

8 Механическая гибридная силовая установка как кардинальное решение экономических и экологических проблем коммерческого транспорта в мегаполисе [Электронный ресурс] / Н. В. Гулиа, В. В. Давыдов, В. А. Бабин, А. И. Лаврентьев // Наука и техника. – 2007. – Режим доступа: http://n-t.ru/tp/ts/mg.htm.

9 Мацкерле Ю. Современный экономичный автомобиль [Текст] / Пер. с чешск. В. Б. Иванова; Под ред. А. Р. Бенедиктова. – М. : Машиностроение, 1987. – 320 с.

10 Пчелин Л. К., Иларионов В. А. Расчет показателей тормозной динамичности автомобиля [Текст] // Автомобильная промышленность. – 1976. № 1. – С. 19-21.