

ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ В ПРИМЕНЕНИИ ГИБРИДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ С МАХОВИКОМ

Тарраф Мохаммад¹, В. В. Гаевский¹, Диб Мухаммад²

¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Россия, 125319, г. Москва, пр. Ленинградский, 64

²Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1

Среди нескольких типичных методов хранения энергии маховичный накопитель обладает такими преимуществами, как мгновенная мощность, высокая эффективность, быстрый отклик, экологичность и длительный срок службы, что делает его идеальной технологией вторичного хранения энергии для традиционных автомобилей с двигателем внутреннего сгорания. Хотя в прикладных исследованиях технологии хранения энергии на маховике достигнут определенный прогресс; в России и за рубежом нет подробных исследований, которые бы обобщили ее применение в автомобильной промышленности. В статье проведен поиск данных в базе Engineering Village и Web of Science по теме «маховичный накопитель энергии», проанализирован ход исследований технологии хранения энергии маховика в автомобильной промышленности.

Результаты поиска показывают, что данная технология изучалась в течение последних 20 лет, при этом являясь нишевым направлением исследований. Что касается двух типичных гибридных систем с маховиком, а именно электрического и механического привода, авторы сосредоточились на истории изучения, исследования и проверки механической гибридной системы в автомобильной промышленности, а также на структурных характеристиках этой системы, текущем состоянии исследований и будущих тенденциях. Всесторонний анализ показывает, что механическая система благодаря чисто механической связи между маховиком и системой трансмиссии автомобиля не только решает проблему недостаточной мощности и экономии энергии, но и повышает эффективность преобразования энергии в автомобильной гибридной силовой системе с маховиком.

Ключевые слова: гибридный автомобиль, система накопления энергии, автомобильный аккумулятор, гибридная трансмиссия, автоматическая механическая трансмиссия, маховик с электрическим приводом, бесступенчатая трансмиссия «БСТ».

Введение

Гибридные технологии являются действенным способом повышения эффективности и качества эксплуатации транспортных средств [1–3], включая основные электрические и механические гибридные технологии [4].

Механические гибридные системы состоят из мощного накопителя энергии и бесступенчатой трансмиссии или зубчатой пары, соединенных с обычной трансмиссией для обеспечения дополнительной мощности, необходимой для основной трансмиссии. Типичные технологии хранения энергии включают в себя физические (например, насосные накопители, накопители сжатого воздуха, маховики), химические (например, аккумуляторы, топливные элементы, проточные батареи, суперконденсаторы) и электромагнитные накопители (например, сверхпроводящие электромагнитные накопители энергии) [5–7].

Автомобильные накопители энергии определяются их характеристиками, т.е. емкостью, выходной мощностью, скоростью разряда и саморазряда, энергоэффективностью, сроком службы, размерами и стоимостью. Свойства каждой технологии хранения энергии показаны на рис. 1 [8–9].

На рис. 1а приведены разные типы источников питания, их энергоемкость и время, в течение которого каждый из них может обеспечивать питание. Рис. 1а разделен на три области: слева снизу находятся устройства, обеспечивающие точное соответствие параметров электропитания заданным; справа сверху — устройства, которыми легко управлять и переключать режимы, а между этими областями расположены источники, пригодные для резервного электропитания. Кроме того, КПД и ожидаемое количество циклов позволяют оценить характеристики накопителя энергии.

Как показано на рис. 1б, КПД суперконденсатора и маховика может достигать 95 % при глубине разряда 80 % и количестве циклов более 10000, КПД батареи составляет около 60 %–90 % при количестве циклов 1000–4000. Несмотря на то, что КПД топливного элемента невысок, время цикла и количество циклов относительно велики [10–11]. В настоящее время силовые аккумуляторы и суперконденсаторы, являющиеся основными накопителями энергии для автомобилей, могут удовлетворить потребность автомобилей в энергии при различных условиях работы, но они не могут одновременно учитывать требования к удельной мощности и удельной энергии; в то время как маховики спо-

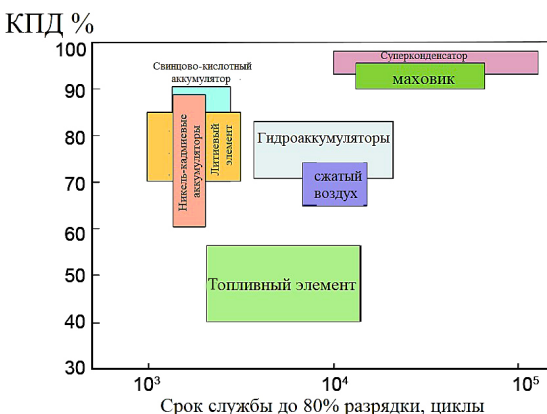
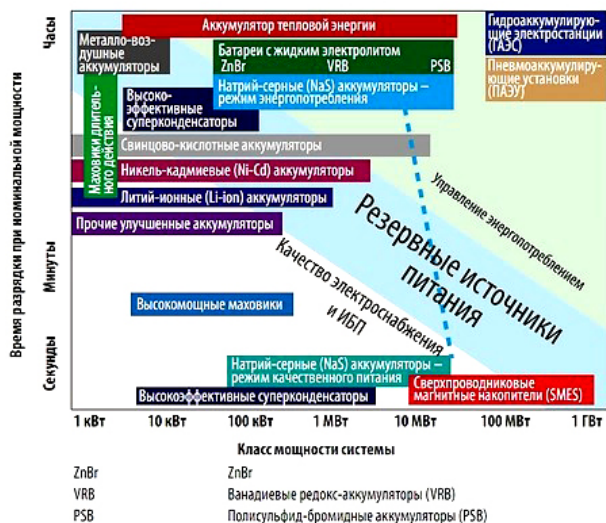


Рис. 1. Сравнение характеристик накопителей энергии:
а — различные виды накопителей энергии;
б — КПД цикла и ожидаемый срок службы [9]
Fig. 1. Comparison of the characteristics of energy storage devices: а — different types of energy storage devices;
б — cycle efficiency and expected service life [9]

способны удовлетворить вышеуказанные требования с относительно высокой удельной энергией и удельной мощностью, а также с высоким сроком службы и энергоэффективностью.

В октябре 2009 г. Международная автомобильная федерация (FIA) отметила важность гибридных систем с маховиком для автомобильного применения. Совет по технологической стратегии Великобритании спонсирует три исследовательских проекта по маховичным гибридам и имеет большое количество передовых маховичных гибридных техно-

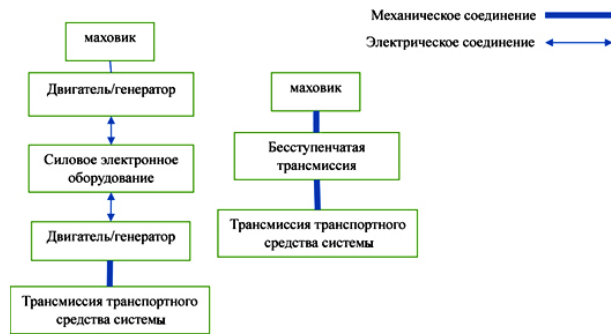


Рис. 2. Архитектура гибридной системы с маховиком
Fig. 2. Architecture of a hybrid system with flywheel

логий для использования в автомобилях. В декабре 2011 г. Министерство энергетики США поручило Национальной лаборатории Ок-Ридж провести оценку гибридных систем с маховиком и отметило, что эта технология, обладающая высокой удельной мощностью и характеристиками хранения энергии, имеет большой потенциал для применения в гибридных автомобилях [12–13]. Система хранения энергии на маховике является идеальной технологией хранения вторичной энергии для обычных автомобилей с двигателем внутреннего сгорания, которая может сохранять и передавать кинетическую в виде механической энергии при замедлении автомобиля.

Гибридные системы с маховиком для транспортных средств

Архитектура гибридной системы с маховиком

Национальная лаборатория Ок-Ридж (ORNL) предложила две типичные структуры гибридных энергосистем на маховиках — гибридные энергосистемы с электрическим приводом и механическим маховиком, как показано на рис. 2 [14–17].

Гибридная система маховика с электрическим приводом по своей структуре похожа на маховиковую батарею, но энергия, запасенная в маховике, составляет лишь одну десятую или даже несколько процентов от энергии маховиковой батареи, поэтому гироскопический эффект пренебрежимо мал, а безопасность выше, чем у маховиковой батареи. В системе электрического привода энергия между маховиком и системой привода автомобиля преобразуется в виде: механической энергии → электрической энергии → механической энергии. В то время как в механической системе механическая энергия маховика непосредственно приводится в движение автомобилем через бесступенчатую трансмиссию, и разница между ними заключается в способе вво-

Таблица 1. Сравнение технических характеристик маховичных гибридных систем
Table 1. Comparison of technical characteristics of flywheel hybrid systems

Структурная форма	Форма передачи энергии	Метод передачи энергии с мощностью маховика	Эффективность преобразования энергии	Условия эксплуатации маховика	Системная интеграция	Требования к двигателям/контроллерам
с электрическим приводом	последовательное соединение	электрическая трансмиссия	низкая	герметизация	очень высокая	требуются высокопроизводительные системы электропривода
механический	параллельное соединение	бесступенчатая трансмиссия	высокая	герметизация	высокая	низкие

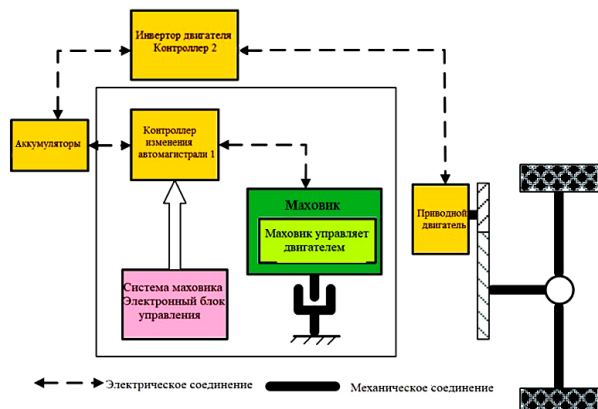


Рис. 3. Структура гибридной электрической трансмиссии с маховиком
Fig. 3. Structure of a hybrid electric transmission with a flywheel

да/вывода энергии маховика, а конкретные технические характеристики приведены в табл. 1 [18].

Гибридная система с электрическим приводом маховика

Структура маховичной гибридной системы с электрическим приводом аналогична структуре маховичных батарей, поскольку преобразование энергии осуществляется через электродвигатель/генератор и силовое электронное оборудование [19–20]. Использование энергии рекуперативного торможения и отдача энергии от маховика осуществляются за счет преобразования кинетической энергии в электрическую, что является неэффективным способом передачи энергии, а ее количество полностью зависит от мощности системы электропривода. Такая конструкция не требует высокой степени системной интеграции, а величина высвобождаемой энергии относительно велика. На рис. 3 показана гибридная система с электрическим приводом на маховике, разработанная компанией Williams Hybrids Ltd. в Великобритании, в которой используется уникальная маховичная конструкция, в которой двигатель управления скоростью встроен в маховик, а ротор двигателя интегрирован с ротором маховика.

Ключевое различие между маховичной гибридной системой и батареей заключается в том, что маховичная батарея сосредоточена на характеристиках высокого запаса энергии и низкого рассеивания энергии, ее масса маховика больше, а рабочая скорость выше, что приводит к большому гироскопическому эффекту, и трудно гарантировать безопасность, а стоимость системы выше. С другой стороны, высокая плотность мощности маховика гибридной системы может лучше удовлетворить кратковременный спрос на высокую мощность во время ускорения, и он может восстановить кинетическую энергию в условиях торможения, что позволяет избежать требований маховичных батарей к скорости вращения, массе ротора и низкому рассеиванию энергии.

Гибридная система с механическим маховиком

Гибридные системы с механическим маховиком просты, компактны и легки, поскольку для них не требуются электродвигатели/генераторы, сило-

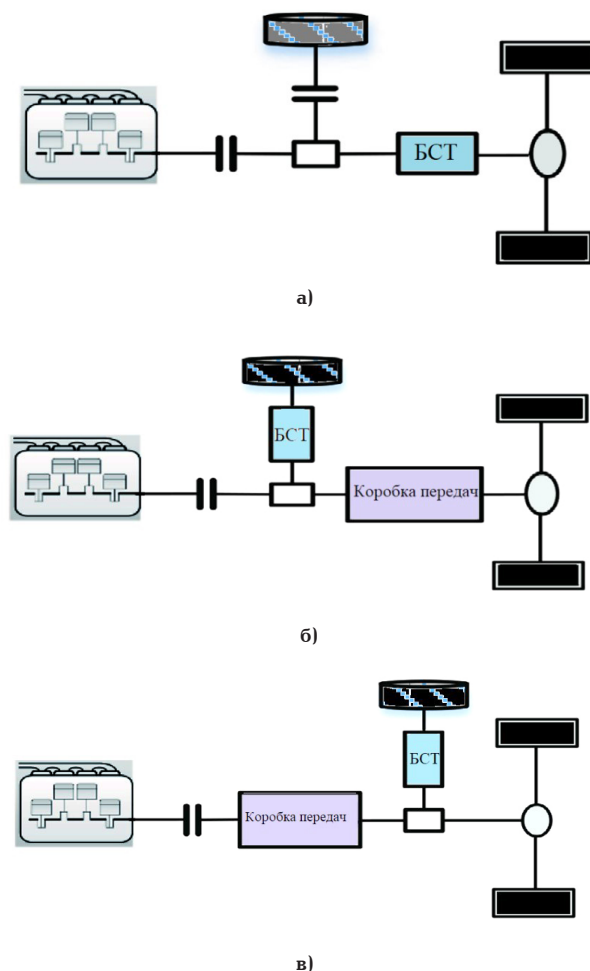


Рис. 4. Структура гибридной механической коробки передач с маховиком: а — параллельный тип I; б — параллельный тип II; в — параллельный тип III
Fig. 4. Structure of hybrid mechanical transmission with flywheel: а — parallel type I; б — parallel type II; в — parallel type III

вая электроника и другие компоненты [21–24]. При замедлении транспортного средства кинетическая энергия трансмиссии непосредственно накапливается в маховике в виде механической энергии; при ускорении или подъеме по склону вращающийся маховик используется как вспомогательный источник энергии, соединенный с трансмиссией через сцепление (или БСТ) для мгновенной компенсации высокой мощности двигателя. Поскольку форма преобразования энергии между маховиком и системой трансмиссии не изменилась, эффективность передачи энергии выше, чем у электропривода. Типичная структура гибридной системы с механическим маховиком показана на рис. 4.

На рис. 4а двигатель и маховик соединяются или разъединяются через муфту сцепления и муфту мощности, так что двигатель может работать в экономической зоне и одновременно заряжать маховик при низких нагрузках; при высоких нагрузках маховик может обеспечивать дополнительную резервную мощность для двигателя. Недостатки этой конфигурации заключаются в том, что скорость маховика не регулируется, а стратегия управления относительно сложна, когда мощность соединена с выходом. В параллельном типе (рис. 4б) точка мощности двигателя может регулироваться БСТ, двигатель работает в экономической зоне, а ско-

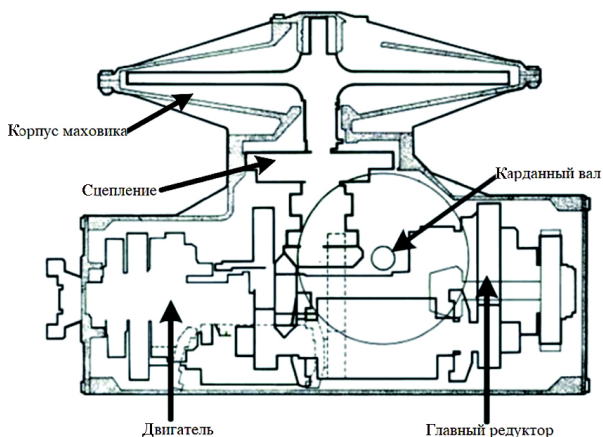


Рис. 5. Гибридная силовая установка на маховике компании Lockheed Missiles and Space
Fig. 5. Lockheed Missiles and Space's flywheel hybrid propulsion system

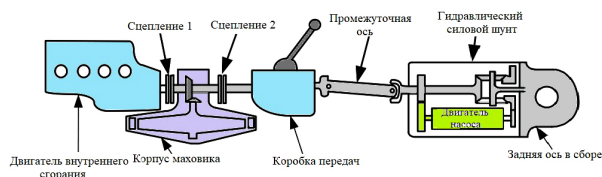


Рис. 6. Гибридная силовая установка на маховике Висконсинского университета
Fig. 6. University of Wisconsin's flywheel hybrid powertrain

рость маховика может регулироваться, но наличие БСТ снижает эффективность преобразования энергии. В параллельном типе (рис. 4в) маховик и БСТ расположены за коробкой передач, что позволяет легко интегрировать их в существующую трансмиссию и реализовать рекуперацию энергии торможения, но точка мощности двигателя не так легко регулируется.

Ход исследований автомобильной маховиковой системы хранения энергии Стадия первоначальных исследований

В 1971 г. компания Lockheed Missiles and Aerspace предложила концепцию маховичного гибридного транспортного средства и разработала параллельную маховичную гибридную систему [25], как показано на рис. 5. В этой системе маховик и двигатель соединены параллельно. Когда сцепление включено, маховик соединяется с двигателем и может передавать мощность на заднюю ведущую ось через карданный вал. Задача маховика — противостоять изменениям скорости вращения, что помогает стабилизировать вращение вала при колебаниях крутящего момента от источника энергии, например, поршневого двигателя, или при периодической нагрузке на него.

В конце 1970-х гг. Фрэнк и Бичли из Висконсинского университета разработали параллельную гибридную трансмиссию [26], как показано на рис. 6. Система состоит из параллельно расположенных двигателей объемом 2,4 л и маховика, сцепления 1 в качестве сцепления двигателя, сцепления 2 в качестве сцепления карданного вала и обычной четырехступенчатой коробки передач с гидравлическим

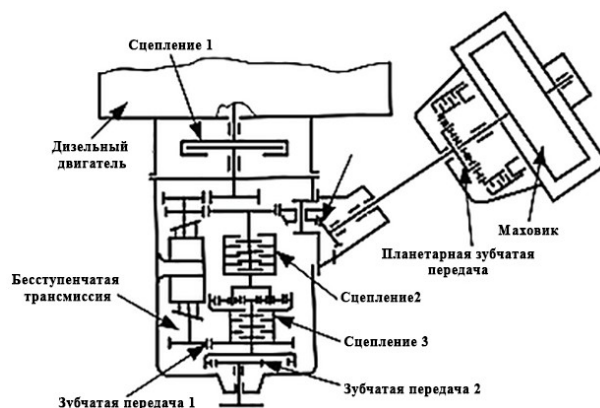


Рис. 7. Маховичная гибридная трансмиссия Gyrobus
Fig. 7. Gyrobus flywheel hybrid transmission

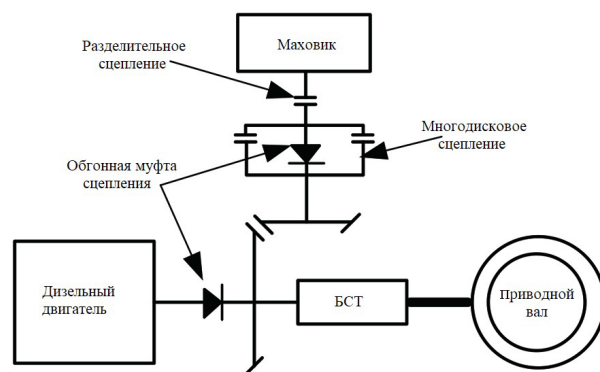


Рис. 8. Маховичная гибридная трансмиссия Greenwood
Fig. 8. Greenwood flywheel hybrid transmission

делителем мощности в качестве блока БСТ. Когда автомобиль работает на холостом ходу, сцепление 1 включено и двигатель приводит во вращение маховик, восстанавливая часть кинетической энергии холостого хода. При включении сцепления 2 мощность маховика выводится.

В 1981 г. Хагин и др. разработали энергосистему с маховиком на базе автомобиля Gyrobus [26], как показано на рис. 7. Маховик с емкостью 0,75 кВт·ч соединен с планетарной коробкой передач и запараллелен с дизельным двигателем мощностью 100 кВт, что позволяет реализовать режимы гидростатической и гидромеханической трансмиссий.

1. Гидростатический режим трансмиссии: сцепление 1 включено, сцепления 2 и 3 отключены, мощность маховика замедляется планетарными шестернями, соединяется с мощностью двигателя и, наконец, передается на ведущую ось через зубчатые пары 1 и 2.

2. Гидромеханический режим трансмиссии: сцепление 1, 2 и 3 объединены, маховик соединяется с мощностью двигателя, затем вводится через сцепление 2 и планетарную рейку, солнечное колесо выводится и затем передается на сцепление 3, и, наконец, зубчатая пара 2 увеличивает крутящий момент и затем приводит в движение колеса.

В 1986 г. Greenwood предложил концептуальную гибридную трансмиссию с маховиком, показанную на рис. 8.

Маховик соединен с муфтой выключения сцепления последовательно с комбинированной муф-

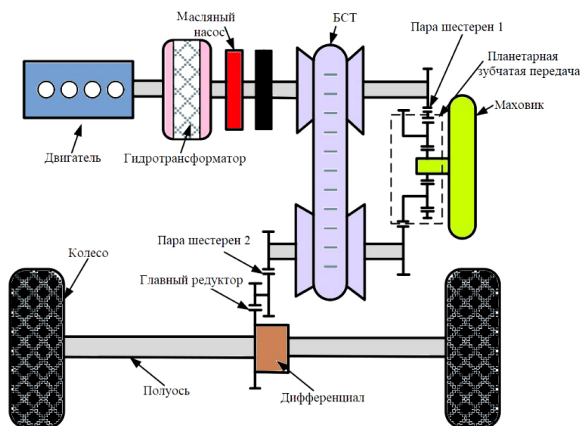


Рис. 9. Гибридная силовая установка с маховиком и нулевой инерцией
Fig. 9. Hybrid powertrain with flywheel and zero inertia

той (обгонная муфта параллельно с многодисковой муфтой), а мощность соединена с трансмиссией автомобиля через конические шестерни [27]. Поток мощности от дизельного двигателя является однонаправленным и передается на трансмиссию, где колеса приводятся в движение через БСТ. Комбинированное сцепление обеспечивает двустороннюю передачу энергии между маховиком и трансмиссией, при этом маховик может передавать энергию на трансмиссию через разъединительную и обгонную муфты, а также возвращать ее через многодисковую муфту и разъединительную муфту.

Этап исследований и разработок

В начале XXI в. отечественные и зарубежные автомобильные компании и исследовательские институты разработали целый ряд гибридных систем с маховиком на основе передовой технологии управления трансмиссией, как показано на рис. 4б и 4в. Такие системы не только в полной мере используют высокие удельные мощностные характеристики маховика, но и эффективно решают проблему недостаточной мощности и экономии энергии, вызванную ограничением мощности системы электропривода в электромобилях. Кроме того, механическая мощность маховика в системе может быть напрямую соединена с обычной трансмиссией, что значительно повышает эффективность рекуперативного торможения и ускорения автомобиля [27].

В 2001 г. в Технологическом университете Эйндховена (Нидерланды) была разработана безынерционная трансмиссия, как показано на рис. 9. БСТ управляет работой двигателя вблизи точки оптимальной эффективности, но из-за неминимальных фазовых характеристик системы при ускорении возникает явление гистерезиса, и безынерционная трансмиссия может эффективно избежать сопротивления ускорению, вызванного инерцией двигателя при разгоне автомобиля [28–29].

При ускорении дроссельная заслонка двигателя открывается шире, а БСТ уменьшает передаточное число для увеличения крутящего момента привода, чтобы удовлетворить потребности водителя в мощности. Чтобы избежать снижения скорости, вызванного сопротивлением системы при разгоне, на рис. 9 к обычной трансмиссии автомобиля добавлены маховик и планетарная коробка передач.

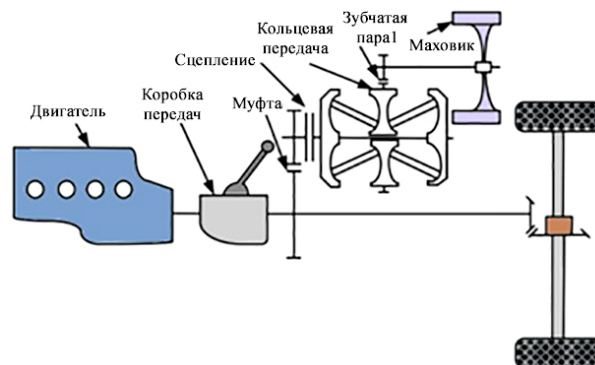


Рис. 10. Гибридная трансмиссия с маховиком от Flybrid Systems
Fig. 10. Flywheel hybrid transmission from Flybrid Systems

Двигатель входит в зацепление с внешним кольцом планетарной коробки передач через зубчатую пару 1, а маховик соединен с валом солнечного колеса. Когда автомобиль ускоряется, вращающийся маховик поворачивает планетарный редуктор, который через зубчатую пару 2, главную коробку передач, дифференциал и полуоси приводит в движение колеса, обеспечивая дополнительную мощность.

Этап проверки

В 2008 г. в британской компании Flybrid Systems была разработана параллельная механическая маховичная трансмиссия [28], как показано на рис. 10. Маховик состоит из углеродного волокна, намотанного на стальную ступицу, с рабочей скоростью 35 000 об/мин (с предельной скоростью 64 500 об/мин). Маховик соединен с кольцевой передачей с фиксированным передаточным отношением через зубчатую пару 1, а выходной вал кольцевой передачи соединен со сцеплением, которое через муфту соединяется с обычной трансмиссией автомобиля.

В 2009 г. компания Flybrid Systems установила систему на болид Формулы 1 общей массой около 17,2 кг и пиковой мощностью 97 кВт. В июне 2011 г. автомобиль, оснащенный гибридной системой Flybrid Flywheel Hybrid System, успешно прошел «24 часа Ле-Мана», став первым гибридным болидом, преодолевшим всю дистанцию соревнований. Когда автомобиль тормозит в повороте, кинетическая энергия кузова накапливается в маховике через кольцевую передачу, и маховик в вакуумном корпусе вращается с высокой скоростью, накапливая энергию. При выходе из поворота энергия, накопленная в маховике, высвобождается через кольцевую коробку передач и соединяется с мощностью двигателя на выходе главной передачи для привода колес.

В 2010 г., основываясь на британском проекте передового применения гибридной системы с маховиком, компания Jaguar Motors разработала прототип гибридной системы с механическим маховиком Jaguar XF [30]. Общая масса системы составляет около 65 кг, а высокоскоростной маховик способен выдавать мгновенную пиковую мощность 60 кВт за 7 с.

В 2014 г. компании Volvo Cars и Torotrak разработали новую гибридную систему с механическим маховиком (Flywheel KERS) и установили ее на заднюю ось тестовой модели S60 T5 [31], как показано на рис. 11. Volvo протестировала свою систему

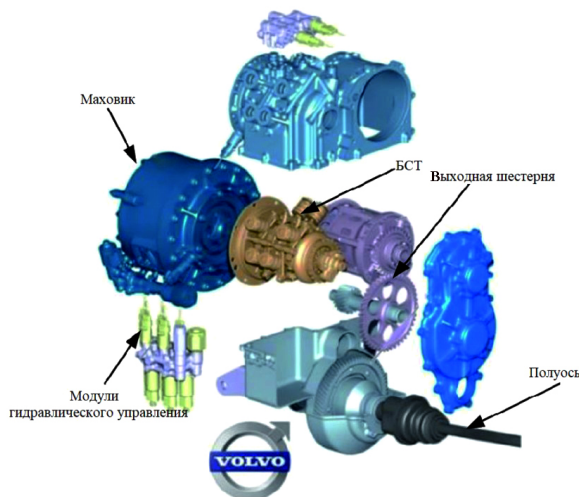


Рис. 11. Гибридная трансмиссия Volvo с маховиком
Fig. 11. Volvo's flywheel hybrid transmission

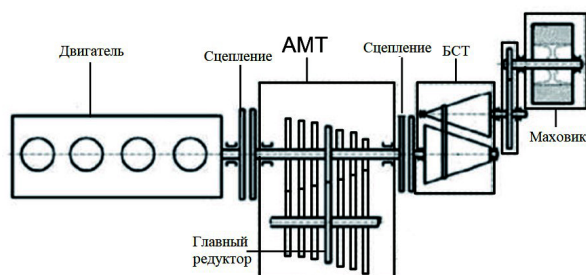


Рис. 12. Гибридная силовая установка на маховике с АТМ
Fig. 12. Hybrid powertrain on flywheel with ATM

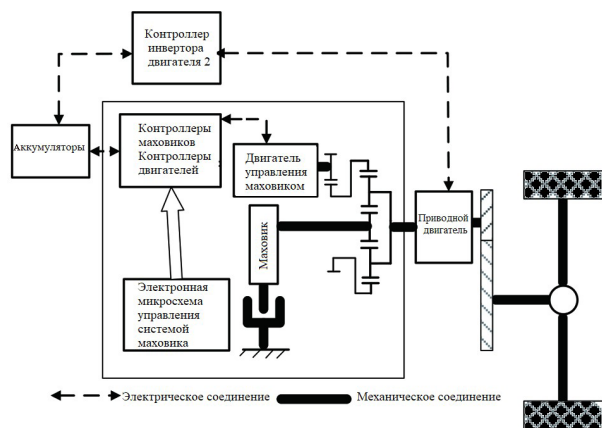


Рис. 13. Маховичная гибридная трансмиссия HAIKE
Fig. 13. HAIKE flywheel hybrid transmission

рекуперации кинетической энергии маховика автомобилей и обнаружила, что данная система может снизить расход топлива на 25 %.

В 2012 г. в Болонском университете была разработана гибридная система с маховиком и автоматизированной механической трансмиссией (АМТ), представленная на рис. 12. В этой системе маховик соединен с входным валом автоматической трансмиссии через БСТ и сцепление, что позволяет рекуперировать энергию торможения и переключать точки нагрузки двигателя [11].

В 2014 г. компания Haike New Energy Company самостоятельно разработала маховичную гибридную систему, показанную на рис. 13 [32], которая позволяет достичь экономии энергии от 30 до 50 % при стандартных условиях работы и улучшить характеристики ускорения всего автомобиля на 50–100 %. Система имеет следующие особенности:

- 1) кинетическая энергия передается непосредственно через планетарный зубчатый механизм с помощью механической муфты, что обеспечивает высокую эффективность использования кинетической энергии при торможении;
- 2) двигатель, управляемый маховиком, способен обеспечить вспомогательную мощность и управление энергией, что снижает потребность в мощности системы электропривода;
- 3) маховик не требует вакуумной рабочей среды, заменяя БСТ в механической системе планетарным механизмом с приводом от двигателя и пополняя энергию маховика в режиме реального времени через двигатель по мере необходимости;
- 4) технология векторного управления двигателем, управляемым маховиком, позволяет добиться идеальной плавности и согласованности работы системы;
- 5) предельная скорость маховика для накопления энергии составляет 25000 об/мин, что делает центробежную силу большой.

Выводы

Из исследования автомобильной гибридной системы с маховиком видно, что гибридная система с маховиком является идеальной технологией хранения вторичной энергии для автомобилей, и система имеет следующие преимущества:

1. Обеспечение стабильного выхода мощности от основного источника питания. Когда автомобиль находится в условиях старта, ускорения и подъема, гибридная система маховика может обеспечить вспомогательную мощность для основного источника энергии, компенсировать мгновенную высокую мощность и уменьшить потери мощности основного источника энергии. То есть, при условии обеспечения одинаковой мощности, рабочий объем двигателя может быть уменьшен без необходимости создания большого резерва мощности.

2. Повышенная эффективность преобразования энергии. Поскольку удельная мощность маховика намного выше, чем у аккумулятора, гибридная система с маховиком способна быстро накапливать энергию в виде механической энергии при движении автомобиля на спуске и торможении, причем на скорость накопления энергии не влияет скорость химической реакции «активных веществ» электродов аккумулятора.

3. По сравнению с электрическими гибридными системами, срок службы гибридной системы с маховиком может соответствовать полному жизненному циклу автомобиля, а сама система имеет длительный цикл технического обслуживания, что является экологически чистым и не загрязняющим окружающую среду.

Однако распространение гибридных систем с маховиком в транспортных средствах ограничено технологией, ценой и другими факторами. Дальнейшие исследования по-прежнему необходимы в следующих двух аспектах:

1. Безопасность маховичных гибридных систем. Хотя скорость вращения маховика-накопителя

энергии значительно уменьшилась по сравнению с маховиковой батареей, масса автомобильного маховика ограничена легким весом автомобиля и расположением трансмиссии, поэтому его нелегко увеличить в размерах; чтобы максимизировать энергию, запасенную в маховиковой системе, необходимо увеличить скорость вращения маховика, что приведет к увеличению риска отказа системы.

2. Параметры системы должны быть правильно подобраны. Гибридная силовая система с маховиком в качестве вспомогательного источника энергии, применяемая к традиционному автомобилю с двигателем внутреннего сгорания, должна обеспечивать динамику автомобиля в соответствии с предпосылкой улучшения экономии топлива, насколько это возможно, в то время как дополнительное увеличение массы маховика противоречит цели создания легких автомобилей, как разумно управлять гибридной силовой системой с маховиком, стоимостью массы, эффективностью, плотностью мощности и плотностью энергии, чтобы сделать ее экономически эффективной при различных целях для достижения оптимальной экономической эффективности, необходимо изучить дальше. Вопрос о том, как рационально контролировать массогабаритные показатели, КПД, плотность мощности и плотность энергии гибридной системы маховика, чтобы оптимизировать ее экономическую эффективность при различных целях использования, требует дальнейшего обсуждения.

Список источников

1. Красневский Л. Г., Николаев Ю. И. Перспективы применения гибридных силовых установок в военной автомобильной технике (по материалам зарубежной печати) // Актуальные вопросы машиноведения. 2014. Вып. 3. С. 77–82. EDN: ZCHPGJ.
2. Наказной О. А., Харитонов С. А., Никитин В. А. Частичная оценка целесообразности применения электрической трансмиссии быстроходных гусеничных машин // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 10. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-10-974.
3. Машков К. Ю., Наумов В. Н. О повышении проходимости транспортных роботов // Оборонная техника. 2008. № 1–2. С. 63–67.
4. Бахмутов С. В., Селифонов В. В. Экологически чистый городской автомобиль с гибридной силовой установкой // Наука — производству. 2001. № 7.
5. Накопитель энергии (Архивная копия от 15 июня 2022) // Wayback Machine // Большая российская энциклопедия. https://old.bigenc.ru/technology_and_technique/text/2246533 (дата обращения: 10.03.2024).
6. Huggins R. A. Energy Storage. Springer Science & Business Media, 2010. 424 p. ISBN 9781441910233.
7. Castelvechi D. Flywheels: Spinning into Control. URL: <https://web.archive.org/web/20140606223717/http://sciencewriter.org/flywheels-spinning-into-control/> (дата обращения: 16.03.2019).
8. Electricity Storage Association (with Thermal Storage data added by author). 2010. URL: www.electricitystorage.org/ESA/technologies (дата обращения: 16.03.2019).
9. Berry G. Present and future electricity storage for intermittent renewables // The 10–50 Solution: Technologies and Policies for a Low-Carbon Future. 2009. URL: <https://studylib.net/doc/18563873/present-and-future-electricity-storage-for-intermittent> (дата обращения: 01.04.2024).
10. Guney M. S., Tepe Y. Classification and assessment of energy storage systems // Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 75. P. 1187–1197. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.102.

11. Hannan M. A., Azidin F. A., Mohamed A. Hybrid electric vehicles and their challenges: A review // Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 29. P. 135–150.
12. Hansen J. G. R., O'Kain D. U. An assessment of flywheel high power energy storage technology for hybrid vehicles. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 2011. URL: <https://info.ornl.gov/sites/publications/files/Pub31707.pdf> (дата обращения: 10.12.2011).
13. Hasanov A. H. oglu, Hashimov E., Zulfugarov B. Comparative analysis of the efficiency of various energy storages // Advanced Information Systems. 2023. Vol. 7(3). P. 74–80. DOI: 10.20998/2522-9052.2023.3.11.
14. Zhang J., Huang L., Chen Z. Research on flywheel energy storage system and its operation control technology // Chinese Journal of Electrical Engineering. 2003. Vol. 23 (3). P. 108–111.
15. Моисеенко В. Л., Дмитриев А. В., Максимчик К. В., Письменная Н. В. Эксплуатация гибридного привода на железнодорожном транспорте // Проблемы безопасности на транспорте: материалы X Междунар. науч.- практ. конф. (Гомель, 26–27 ноября 2020 г.). В 5 ч. / под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. Гомель: Изд-во БелГУТ, 2020. Ч. 5. С. 94–96. EDN: EBKITN.
16. Bolund B., Bernhoff H., Leijon M. Flywheel energy and power storage systems // Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2007. Vol. 11 (2). Vol. 235–258. DOI: 10.1016/j.rser.2005.01.004.
17. Tang X., Hu X., Yang W., Yu H. Novel Torsional Vibration Modeling and Assessment of a Power-Split Hybrid Electric Vehicle Equipped With a Dual-Mass Flywheel // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2017. Vol. 67, № 3. DOI: 10.1109/TVT.2017.2769084.
18. Dhand A., Pullen K. Review of flywheel based internal combustion engine hybrid vehicles // International Journal of Automotive Technology. 2013. Vol. 14 (5). P. 707–804. DOI: 10.1007/s12239-013-0088-x.
19. Hebner R., Beno J., Walls A. Flywheel Batteries come around again // IEEE Spectrum. 2002. Vol. 39 (4). P. 46–51. DOI: 10.1109/6.993788.
20. Mouratidis P., Schüßler B., Rinderknecht S. Hybrid Energy Storage System consisting of a Flywheel and a Lithium-ion Battery for the Provision of Primary Control Reserve // 2019 8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Brasov, Romania. 2019. P. 94–99. DOI: 10.1109/ICRERA47325.2019.8996553.
21. Diego U., Martinea P., Mcglashan N. The mechanical hybrid vehicle: an investigation of a flywheel-based vehicular regenerative energy capture system // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2008. Vol. 222 (11). P. 2087–2101. DOI: 10.1243/09544070JAUTO677.
22. Шабанов А. В., Ломакин В. В., Шабанов А. А., Сальников В. И. Применение комбинированных силовых установок на автомобилях и экологическая безопасность окружающей среды // Известия МГТУ «МАМИ». 2013. Т. 1, № 1 (15). С. 232–239. DOI: 10.17816/2074-0530-68365. EDN: QIMILT.
23. Zhang X., Chu Jiangwei, Li H. [et al.]. Key technologies of flywheel energy storage systems and current development status // Energy Storage Science and Technology. Vol. 2015. Vol. 4 (1). P. 55–60.
24. Dhand A., Pullen K. R. Review of Flywheel based Internal Combustion Engine Hybrid Vehicles // International Journal of Automotive Technology. 2013. Vol. 14 (5). P. 797–804. DOI: 10.1007/s12239-013-0088-x.
25. Hofman T., van Drutenet R. M., Hoekstra D. [et al.]. Optimal design of energy storage systems for hybrid vehicle drivetrains // IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2005. DOI: 10.1109/VPPC.2005.1554535.
26. Song L., Yi Y., Xiaoliang Z. Research on Energy Management Strategy for Electric Vehicles Based on Flywheel Energy Storage // 2024 IEEE 2nd International Conference on Control, Electronics

and Computer Technology (ICCECT), Jilin, China. 2024. P. 205–210. DOI: 10.1109/ICCECT60629.2024.10545973.

27. Greenwood C. J. Integration of a commercial vehicle regenerative braking driveline // Int. Conf. Integrated Engine Transmission Systems. 1986. P. 127–133.

28. Brockbank C., Greenwood C. Fuel economy benefits of a flywheel and CVT based mechanical hybrid for city bus and commercial vehicle applications // SAE International Journal of Commercial Vehicles. 2010. Vol. 2 (2). P. 115–122. DOI: 10.4271/2009-01-2868.

29. Vroemen B., Serrarens A. F. A., Veldpaus F. Hierarchical control of the zero-inertia powertrain // SAE Reviews. 2001. Vol. 22 (4). P. 519–526. DOI: 10.1016/S0389-4304(01)00139-4.

30. Alirezaei M., Kanarachos S., Scheepers B., Maurice J. P. Experimental evaluation of optimal Vehicle Dynamic Control based on the State Dependent Riccati Equation technique // 2013 American Control Conference, Washington, DC, USA. 2013. P. 408–412.

31. Volvo Cars tests of flywheel technology confirm fuel savings of up to 25 percent // Volvo Car Group. URL: <https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/pressreleases/48800> (дата обращения: 25.04.2013).

32. Haike New Energy Team. «Electric» flywheel hybrid system-cyclic kinetic propulsion system // Changzhou Haike New Energy Technology. URL: <http://www.chk-net.com/product.asp?id=12> (дата обращения: 20.07.2012).

ТАРРАФ МОХАММАД, аспирант кафедры «Автомобили» Московского автомобильно-дорожного госу-

дарственного технического университета (МАДИ), г. Москва.

Адрес для переписки: mohammadasaat90@gmail.com
ГАЕВСКИЙ Виталий Валентинович, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Автомобили» МАДИ, г. Москва.

SPIN-код: 2212-1128

AuthorID (РИНЦ): 293298

Адрес для переписки: vit-life@rambler.ru

ДИБ МУХАММАД, кандидат технических наук, ассистент кафедры «Электромеханика, электрические и электронные аппараты» Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва.

AuthorID (SCOPUS): 57216623195

Адрес для переписки: muhamaddeeb002@gmail.com

Для цитирования

Тарраф Мохаммад, Гаевский В. В., Диб Мухаммад. Обзор результатов в применении гибридных транспортных систем с маховиком // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2024. Т. 8, № 4. С. 63–72. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-4-63-72.

Статья поступила в редакцию 26.08.2024 г.

© Тарраф Мохаммад, В. В. Гаевский,
Диб Мухаммад

OVERVIEW OF RESULTS IN THE APPLICATION OF FLYWHEEL HYBRID TRANSPORTATION SYSTEMS

Tarraf Mokhammad¹, V. V. Gayevskiy¹, Deeb Mukhammad²

¹Moscow State Automobile and Road Construction State Technical University,
Russia, Moscow, Leningradskiy Ave., 64, 125319

²National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya, 14, bld. 1, 111250

Among several typical energy storage methods, that flywheel energy storage has advantages such as high instantaneous power, high-performance and long service life, making it perfect secondary energy storage technology for traditional internal combustion engine vehicles. Although some progress has been made in the applied research of flywheel energy storage technology, there are no detailed studies at home and abroad that summarize its application in the vehicle applications. This paper searches the data on «flywheel energy storage», analyzes the research progress of flywheel energy storage in automotive industry, and analyzes the research progress of flywheel energy storage in vehicle applications. The search data show that flywheel energy storage technology for the vehicle applications has been studied for the last 20 years, although it is a niche research area. With respect to two typical flywheel hybrid systems, namely electric and mechanical drive, we have focused on the history of the study, research and validation of mechanical flywheel hybrid system in the automotive industry, as well as the structural characteristics of this system, the current state of research and future research trends.

Keywords: hybrid vehicle, energy storage system, car battery, hybrid transmission, automated manual transmission, electrically driven flywheel, continuously variable transmission.

References

1. Krasnevskiy L. G., Nikolayev Yu. I. Perspektivy primeneniya gibridnykh silovykh ustanovok v voyennoy avtomobil'noy tekhnike (po materialam zarubezhnoy pechati) [Perspectives of application of hybrid powerplants in military vehicles (according to the materials of foreign media)] // Aktual'nyye voprosy mashinovedeniya. *Actual Issues of Mechanical Engineering*. 2014. Issue. 3. P. 77–82. EDN: ZCHPGJ. (In Russ.).
2. Nakaznoy O. A., Kharitonov S. A., Nikitin V. A. Chastichnaya otsenka tselesoobraznosti primeneniya elektricheskoy transmissii bystrokhodnykh gusenichnykh mashin [Private assessment of electrical transmissions appropriateness in high-speed tracked vehicles] // Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2013. Issue 10. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-10-974. (In Russ.).
3. Mashkov K. Yu., Naumov V. N. O povyshenii prokhodimosti transportnykh robotov [On improving the cross-country mobility of transportation robots] // Oboronnaya tekhnika. *Defence Equipment*. 2008. No. 1–2. P. 63–67. (In Russ.).
4. Bakhmutov S. V., Selifonov V. V. Hibrid güç santralli ekolojik olarak temiz şehir arabası / Nauka — Proizvodstvo. NTP “Virazh-centre”, 2001, № 7. (In Russ.).
5. Nakopitel' energii (Arkhivnaya kopiya ot 15 iyunya 2022) // Wayback Machine // Bol'shaya rossiyskaya entsiklopediya. https://old.bigenc.ru/technology_and_technique/text/2246533 (accessed: 10.03.2024). (In Russ.).
6. Huggins R. A. Energy Storage. Springer Science & Business Media, 2010. 424 p. ISBN 9781441910233. (In Engl.).
7. Castelveccchi D. Flywheels: Spinning into Control. URL: <https://web.archive.org/web/20140606223717/http://science-writer.org/flywheels-spinning-into-control/> (accessed: 16.03.2019). (In Engl.).
8. Electricity Storage Association (with Thermal Storage data added by author). 2010. URL: www.electricitystorage.org/ESA/technologies (accessed: 16.03.2019). (In Engl.).
9. Berry G. Present and future electricity storage for intermittent renewables // The 10–50 Solution: Technologies and Policies for a Low-Carbon Future. 2009. URL: <https://studylib.net/doc/18563873/present-and-future-electricity-storage-for-intermittent> (accessed: 01.04.2024). (In Engl.).
10. Guney M. S., Tepe Y. Classification and assessment of energy storage systems // Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 75. P. 1187–1197. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.102. (In Engl.).
11. Hannan M. A., Azidin F. A., Mohamed A. Hybrid electric vehicles and their challenges: A review // Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 29. P. 135–150. (In Engl.).
12. Hansen J. G. R., O'Kain D. U. An assessment of flywheel high power energy storage technology for hybrid vehicles. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 2011. URL: <https://info.ornl.gov/sites/publications/files/Pub31707.pdf> (accessed: 10.12.2011). (In Engl.).
13. Hasanov A. H. oglu, Hashimov E., Zulfugarov B. Comparative analysis of the efficiency of various energy storages // Advanced Information Systems. 2023. Vol. 7(3). P. 74–80. DOI: 10.20998/2522-9052.2023.3.11. (In Engl.).
14. Zhang J., Huang L., Chen Z. Research on flywheel energy storage system and its operation control technology // Chinese Journal of Electrical Engineering. 2003. Vol. 23 (3). P. 108–111. (In Engl.).
15. Moiseyenko V. L., Dmitriyev A. V., Maksimchik K. V., Pis'mennaya N. V. Ekspluatatsiya gibridnogo privoda na zheleznodorozhnom transporte [Operation of hybrid drive in railway transport] // Problemy bezopasnosti na transporte. *Transport Safety Issues*. In 5 Part / Ed. by

Yu. I. Kulazhenko. Gorn'ye, 2020. Part 5. P. 94–96. EDN: EBKITN. (In Russ.).

16. Bolund B., Bernhoff H., Leijon M. Flywheel energy and power storage systems // *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2007. Vol. 11 (2). P. 235–258. DOI: 10.1016/j.rser.2005.01.004. (In Engl.).

17. Tang X., Hu X., Yang W., Yu H. Novel Torsional Vibration Modeling and Assessment of a Power-Split Hybrid Electric Vehicle Equipped With a Dual-Mass Flywheel // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2017. Vol. 67, no. 3. DOI: 10.1109/TVT.2017.2769084. (In Engl.).

18. Dhand A., Pullen K. Review of flywheel based internal combustion engine hybrid vehicles // *International Journal of Automotive Technology*. 2013. Vol. 14 (5). P. 707–804. DOI: 10.1007/s12239-013-0088-x. (In Engl.).

19. Hebnner R., Beno J., Walls A. Flywheel Batteries come around again // *IEEE Spectrum*. 2002. Vol. 39 (4). P. 46–51. DOI: 10.1109/6.993788. (In Engl.).

20. Mouratidis P., Schüller B., Rinderknecht S. Hybrid Energy Storage System consisting of a Flywheel and a Lithium-ion Battery for the Provision of Primary Control Reserve // 2019 8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Brasov, Romania. 2019. P. 94–99. DOI: 10.1109/ICRERA47325.2019.8996553. (In Engl.).

21. Diego U., Martinea P., Mcglashan N. The mechanical hybrid vehicle: an investigation of a flywheel-based vehicular regenerative energy capture system // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2008. Vol. 222 (11). P. 2087–2101. DOI: 10.1243/09544070JAUTO677. (In Engl.).

22. Shabanov A. V., Lomakin V. V., Shabanov A. A., Salnikov V. I. Primeneniye kombinirovannykh silovyykh ustanovok na avtomobilyakh i ekologicheskaya bezopasnost' okruzhayushchey sredy [Usage of combined power units in vehicles and environmental safety] // *Izvestiya MG TU «MAMI». Izvestia MG TU MAMI*. 2013. Vol. 1, no. 1 (15). P. 232–239. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-68365>. EDN: QIMILT. (In Russ.).

23. Zhang X., Chu Jiangwei, Li H. [et al.]. Key technologies of flywheel energy storage systems and current development status // *Energy Storage Science and Technology*. Vol. 2015. Vol. 4 (1). P. 55–60. (In Engl.).

24. Dhand A., Pullen K. R. Review of Flywheel based Internal Combustion Engine Hybrid Vehicles // *International Journal of Automotive Technology*. 2013. Vol. 14 (5). P. 797–804. DOI: 10.1007/s12239-013-0088-x. (In Engl.).

25. Hofman T., van Drutenet R. M., Hoekstra D. [et al.]. Optimal design of energy storage systems for hybrid vehicle drivetrains // *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. 2005. DOI: 10.1109/VPFC.2005.1554535. (In Engl.).

26. Song L., Yi Y., Xiaoliang Z. Research on Energy Management Strategy for Electric Vehicles Based on Flywheel Energy Storage // 2024 IEEE 2nd International Conference on Control, Electronics and Computer Technology (ICCECT), Jilin, China. 2024. P. 205–210. DOI: 10.1109/ICCECT60629.2024.10545973. (In Engl.).

27. Greenwood C. J. Integration of a commercial vehicle regenerative braking driveline // *Int. Conf. Integrated Engine Transmission Systems*. 1986. P. 127–133. (In Engl.).

28. Brockbank C., Greenwood C. Fuel economy benefits of a flywheel and CVT based mechanical hybrid for city bus and commercial vehicle applications // *SAE International Journal of Commercial Vehicles*. 2010. Vol. 2 (2). P. 115–122. DOI: 10.4271/2009-01-2868. (In Engl.).

29. Vroemen B., Serrarens A. F. A., Veldpaus F. Hierarchical control of the zero-inertia powertrain // *SAE Reviews*. 2001. Vol. 22 (4). P. 519–526. DOI: 10.1016/S0389-4304(01)00139-4. (In Engl.).

30. Alirezaei M., Kanarachos S., Scheepers B., Maurice J. P. Experimental evaluation of optimal Vehicle Dynamic Control based on the State Dependent Riccati Equation technique // 2013 American Control Conference, Washington, DC, USA. 2013. P. 408–412. (In Engl.).

31. Volvo Cars tests of flywheel technology confirm fuel savings of up to 25 percent // Volvo Car Group. URL: <https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/pressreleases/48800> (accessed: 25.04. 2013). (In Engl.).

32. Haike New Energy Team. «Electric» flywheel hybrid system-cyclic kinetic propulsion system // Changzhou Haike New Energy Technology. URL: <http://www.chk-net.com/product.asp?id=12> (accessed: 20.07. 2012). (In Engl.).

TARRAF MOKHAMMAD, Graduate Student of Automobiles Department, Moscow State Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow.

Correspondence address: mohammadasaat90@gmail.com

GAYEVSKIY Vitaliy Valentinovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Automobiles Department, Moscow State Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow.

SPIN-code: 2212-1128

AuthorID (RSCI): 293298

Correspondence address: vit-life@rambler.ru

DEEB MUKHAMMAD, Candidate of Technical Sciences, Assistant of Electromechanics, Electrical and Electronic Apparatuses Department, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow.

AuthorID (SCOPUS): 57216623195

Correspondence address: muhamaddeeb002@gmail.com

For citations

Tarraf Mokhammad, Gayevskiy V. V., Deeb Mukhammad. Overview of results in the application of flywheel hybrid transportation systems // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2024. Vol. 8, no. 4. P. 63–72. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-4-63-72.

Received August 26, 2024.

© Tarraf Mokhammad, V. V. Gayevskiy, Deeb Mukhammad