

УДК 629.027, 629.3.014, 621.313

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ВЫБОР СХЕМЫ ЭЛЕКТРОАМОТИЗАТОРА НЕПОДРЕССОРЕННЫХ МАСС ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

**А.Н. Сергиенко, аспирант, Б.Г. Любарский, доцент, к.т.н.,
В.Б. Самородов, профессор, д.т.н., Н.Е. Сергиенко, доцент, к.т.н., НТУ «ХПИ»**

Аннотация. Выполнен анализ конструкций электромеханических преобразователей энергии транспортных средств и определена рациональная схема преобразователя энергии неподдресоренных масс транспортного средства на примере легкового автомобиля.

Ключевые слова: транспортное средство, подвеска, электромеханический преобразователь, неподдресоренная масса.

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ І ВИБІР СХЕМИ ЕЛЕКТРОАМОТИЗАТОРА НЕПІДРЕСОРЕНИХ МАС ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

**А.М. Сергієнко, аспірант, Б.Г. Любарський, доцент, к.т.н.,
В.Б. Самородов, професор, д.т.н., М.Є. Сергієнко, доцент, к.т.н., НТУ «ХПІ»**

Анотація. Виконано аналіз конструкцій електромеханічних перетворювачів енергії транспортних засобів та визначено раціональну схему перетворювача енергії неідресорених мас транспортного засобу на прикладі легкового автомобіля.

Ключові слова: транспортний засіб, підвіска, електромеханічний перетворювач, неідресоренна маса.

ELECTROMECHANICAL CONVERTERS CONSTRUCTION ANALYSIS AND ELECTRIC SHOCK-ABSORBER SCHEME FOR VEHICLE UN-SPRUNG MASSES SELECTION

A. Serhienko, graduate, B. Liubarskyi, Associate Professor, Candidate of Technical Science, V. Samorodov, Professor, Doctor of Technical Science, N. Serhienko, Associate Professor, Candidate of Technical Science, NTU «KhPI»

Abstract. The analysis of vehicle electromechanical schemes constructions was carried out and the rational scheme of vehicle un-sprung masses energy converter of the motorcar on example was determined.

Key words: vehicle, suspension, electromechanical converter, un-sprung mass.

Введение

Над вопросом рационального использования энергии транспортного средства сегодня работают ведущие ученые фирм, предприятий, которые известны во всем мире. Среди реализуемых проектов на практике создаются механизмы рекуперации энергии при тормо-

жении транспортного средства, прорабатываются варианты использования системы термоэлектрического генератора, преобразователя тепловой энергии выхлопных газов в механическую энергию в паровой турбине (система Turbosteamer), которая монтируется на двигателе и др.

Во многих узлах, системах транспортного средства нерационально и нецеленаправленно используется энергия, которая подводится от двигателя или возникает при его движении. Это в конечном итоге приводит к снижению эффективности использования запаса потенциальной и других видов энергии транспортного средства. Особенно эти проблемы актуальны для автомобильного транспорта, так как повышение эффективности использования энергии огромного парка автомобилей позволит существенно снизить потребление топлива.

В автомобиле наибольшие потери энергии наблюдаются при охлаждении двигателя, при выпуске отработавших газов. Механические и насосные потери в двигателе примерно равны потерям в системе поддрессоривания автомобиля.

С ростом скоростей движения транспортных средств возрастают требования, предъявляемые к ходовым системам, в частности к системе поддрессоривания и устройствам гашения колебаний, возникающих при взаимодействии колес с опорной поверхностью. Наиболее сложным, с точки зрения изучения процессов, протекающих при движении машины, является процесс гашения колебаний, который осуществляет в основном амортизатор.

Потери в подвеске автомобиля, по результатам исследований автора работы [1], составляют порядка 10–11 %. Энергия колебательных масс подвески колес и др. практически на всех автомобилях при движении по неровностям преобразуется в тепловую и рассеивается в окружающую среду. При КПД автомобиля на средних режимах загрузки порядка 6–8 % [1] использование этой энергии для выполнения полезной работы автомобилем становится особенно актуальным.

Анализ публикаций

Передовые достижения науки в короткие сроки внедряются в автомобильном спорте [2–4], ведущими автопроизводителями и их научно-техническими центрами [5, 6] и в специальной технике.

Так, система рекуперации кинетической энергии автомобиля Kinetic energy recovery system (KERS) нашла применение в «Формуле-1». Рекуперативное торможение как вид элек-

трического торможения, при котором электроэнергия, вырабатываемая тяговыми электродвигателями, работающими в генераторном режиме, возвращается через бортовую электрическую сеть на накопитель.

Рекуперативное торможение широко применяется на электровозах, электропоездах, современных трамваях и троллейбусах, где при торможении электродвигатели начинают работать как электрогенераторы, а вырабатываемая электроэнергия передается через контактную сеть либо другим электровозам, либо в общую энергосистему через тяговые подстанции. Аналогичный принцип используется на электромобилях, гибридных автомобилях, где вырабатываемая при торможении электроэнергия используется для подзарядки аккумуляторов или других накопителей.

Созданию систем рекуперации предшествуют теоретические исследования; к примеру, авторами [7] разработана математическая модель привода гибридного автомобиля с синхронным двигателем с постоянными магнитами в универсальной интегрированной среде MATLAB/Simulink. Имитационное моделирование позволило исследовать динамические показатели составляющих узлов гибридного автомобиля при заданном управлении. Сопоставление результатов моделирования с измерениями на автомобиле-прототипе показало отличие менее 5 %.

В настоящее время ведутся работы по созданию и внедрению электромеханических преобразователей в элементы подвески транспортных средств, так как их применение позволяет получить полезную работу при движении транспортного средства.

Цель работы

Цель работы – провести анализ вариантов конструкций электромеханических преобразователей (ЭМП) транспортных средств и выбрать рациональный вариант перспективного энергосберегающего гасителя колебаний для транспортного средства на примере легкового автомобиля.

Анализ конструкций и выбор схемы ЭМП-амортизатора

Идея рекуперации энергии не нова, и по сути KERS [4] является обычной динамо-машиной (ЭМП), изобретенной в 1866 году известным ученым Вернером Сименсом. Одна-

ко для рекуперации энергии в широком диапазоне скоростей движения необходима система питания и управления ЭМП. Развитие системы KERS производится по трем направлениям:

- электрические системы KERS с применением аккумуляторов;
- механические системы KERS с использованием маховика;
- гибридные системы KERS.

На сегодняшний день многие известные фирмы-производители запчастей и комплектующих ведут работы по созданию данного устройства и внедрению его на серийные автомобили. Например, компании Flybrid Systems, Torotrak и Xtrac совместными усилиями разработали вариант системы KERS с использованием маховика (рис. 1) и провели работы по внедрению данного устройства в болид вместе с одной из команд-лидеров «Формулы-1». Принцип работы основан на высокоскоростном маховике из стали и углеродного волокна, который вращается со скоростью 60000 об/мин в вакуумной камере [2, 3]. Маховик подключается к трансмиссии через несколько зубчатых передач с фиксированным передаточным числом, сцеплением и вариатором. Система при массе в 24 кг обеспечивает передачу мощности в 60 кВт (80 л.с.) в обе стороны и может запасать до 600 кДж энергии с учетом потерь.

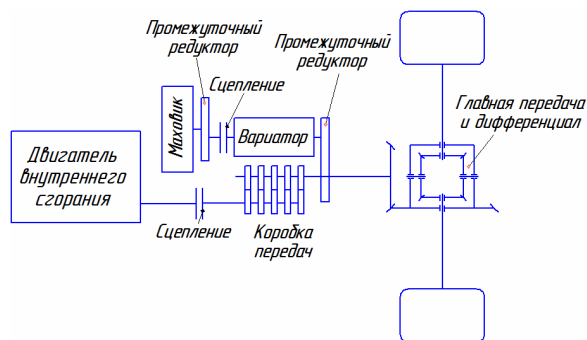


Рис. 1. Принципиальная схема механической системы KERS с использованием механического накопителя – маховика, работающего в вакуумной камере

В сезоне 2009 года в «Формуле-1» на некоторых болидах начала использоваться система рекуперации кинетической энергии (KERS).

Для автомобилей «Формулы-1» с её мощным двигателем разгон на малых скоростях ограничивается сцеплением шин, а не крутящим

моментом. На высоких же скоростях использование KERS не столь эффективно. Так что, по результатам сезона-2009, оснащённые данной системой болиды не продемонстрировали превосходства над соперниками на большинстве трасс. Однако это может объясняться не столько неэффективностью системы, сколько трудностью её применения в условиях строгих ограничений на вес машины, действовавших в 2009 г. в «Формуле-1». После соглашения команд не использовать KERS в 2010 году для сокращения издержек в сезоне 2011 года использование системы рекуперации было продолжено.

По состоянию на 2012 год, на систему KERS были наложены следующие ограничения [3]: передаваемая мощность – не более 60 кВт (около 80 л.с.), ёмкость накопителя – не более 400 кДж. Это означает, что 80 л.с. можно использовать не более 6,67 с на круг за один или несколько раз. Таким образом, время разгона можно уменьшить на 0,1–0,4 с [4].

Второй вариант конструкции системы рекуперации – это электрический вариант системы KERS (рис. 2). Разработкой данной конструкции занимаются фирмы Bosch и Flybridsys, которые в сезоне 2012 установили конструкцию своей системы на болиды 4 команд Формулы-1; остальные команды использовали аналогичную конструкцию собственной разработки.

На рис. 2, а показано, как обычно размещаются основные компоненты KERS в области топливного бака, а также дана схема работы системы. На стадии зарядки кинетическая энергия от тормозов 1 собирается электромотором-генератором 2, а затем, под управлением компьютера 3, заряжает батареи KERS.

На стадии ускорения (рис. 2, б) накопитель подаёт сохранённую энергию в мотор, когда пилот нажимает соответствующую кнопку на рулевом колесе. Количество дополнительной мощности – примерно 80 л.с. и может быть использовано в течение 6,6 с на круге. Система требует размещения дополнительных радиаторов для охлаждения батарей.

Однако стоит отметить, что с 2013 года будет внесена поправка в правила, согласно которой станет возможным использование системы KERS с маховиком (механическим накопителем энергии) [4]. Если сейчас регламент

разрешает использовать только 400 кДж (при возможности в 800 кДж, то есть система работает лишь с половинной эффективностью), то к 2013 году планируется поднять энергию на одном круге до 2 МДж.

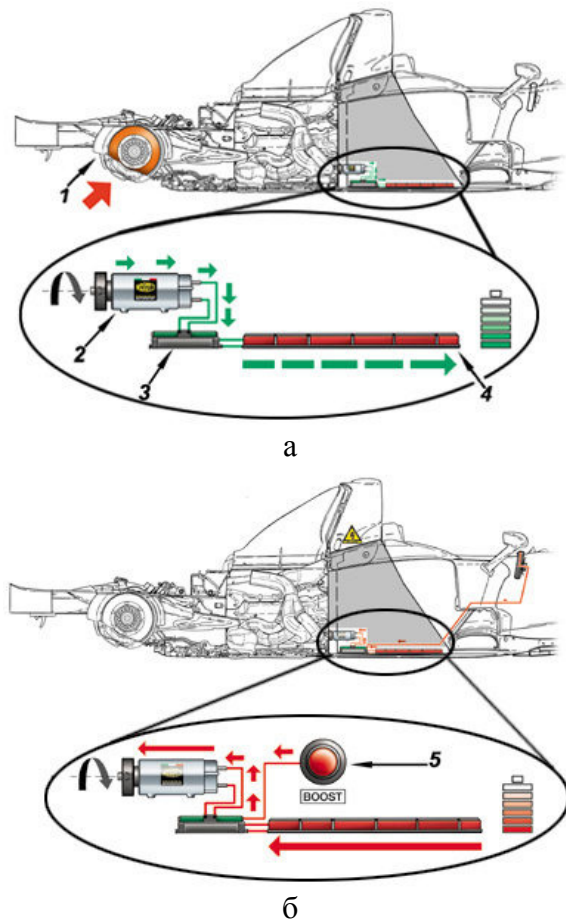


Рис. 2. Компоновка электрической системы KERS на болиде «Формулы-1»: а – работа системы KERS на стадии зарядки; б – работа системы KERS на стадии отдачи энергии при ускорении; 1 – тормоза; 2 – электромотор-генератор; 3 – блок управления; 4 – аккумуляторные батареи; 5 – кнопка активации

Известны также эксперименты по организации рекуперативного торможения автомобилей на основе других принципов – накопления энергии на маховике, в пневматических аккумуляторах, в гидроаккумуляторах и других устройствах, но они пока не нашли широкого применения ввиду своей сложности, дороговизны и высоких требований к безопасности и надежности.

ЭМП на транспортном средстве включает генератор и электродвигатель. Устройства можно выполнить раздельно или в одном

узле, т.к. эти машины обратимые. Анализ показателей электродвигателей постоянного тока (ДПТ), асинхронных двигателей (АД), синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) и синхронного реактивного двигателя (СРД) приведен в табл. 1.

Таблица 1 Сравнительные показатели ЭМП

Показатели	ДПТ	АД	СДПМ	СРД
КПД	0	+	++	+
Отношение максимальной полезной мощности к массе	0	+	++	+
Возможности охлаждения	+	++	+	+
Эксплуатационные характеристики	0	+	+	+
Динамические характеристики	++	+	++	+
Вес	-	+	++	++
Стоимость	++	+	-	+

Примечание. Показатель: «++» – отличный, «+» – хороший, «0» – удовлетворительный, «-» – менее удовлетворительный.

Из данных табл. 1 следует, что ДПТ продолжают применяться на гибридных автомобилях из-за своей дешевизны. Среди таких показателей как КПД, вес, отношение максимальной полезной мощности к массе и динамические характеристики лидирующую позицию занимает синхронный электродвигатель с постоянными магнитами.

Рабочие характеристики, срок службы и безопасность автомобиля с гибридной силовой установкой сильно зависят от накопителей энергии. Основываясь на современных технологиях, в качестве накопителей энергии доминируют электрохимические АКБ. Суперконденсаторы, ионисторы и маховики не заменяют аккумуляторные батареи, которые сочетают в себе легкость технического обслуживания и ремонта, высокую удельную энергию и низкую стоимость, а также отработанные технологии.

Одним из направлений реализации задачи повышения эффективности использования энергии автомобиля является рекуперация кинетической энергии колебательных масс транспортного средства во время движения

по неровностям. Автор работ [5, 6] – инженер Амар Боуз – начал работу над созданием электроподвески Bose Suspension System в 1978 году. Макет был изготовлен в 1995 году. В конструкции на базе седана Lexus LS400 (рис. 3) пружинную подвеску заменили торсионной, а амортизаторы – линейными электродвигателями, которыми через мощные усилители управлял компьютерный блок на основе информации от датчиков хода каждого из колес. Идея такой подвески заключается в следующем: когда колесо опускается в яму на ходе отбоя, электродвигатель активно «помогает» ему перемещаться вниз, а на ходе сжатия «втягивает» колесо вверх. В работе главное внимание уделялось обеспечению плавности движения автомобиля и снижению крена кузова при поворотах.

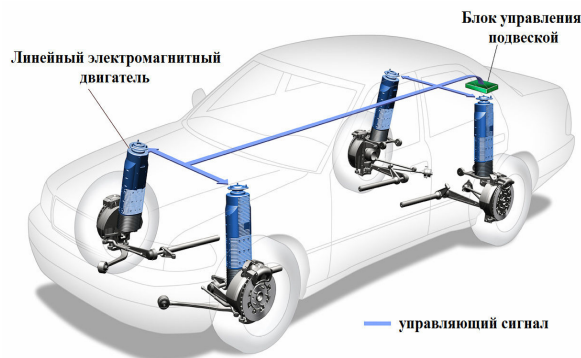


Рис. 3. Принципиальная схема системы Bose «квадро»

Авторы патента [8] предлагают использовать конструкцию электрического амортизатора, включающего в себя витой элемент, наружная часть которого выполнена из электропроводного материала. Магнитный элемент состоит из стержня, на центральной оси которого расположены магниты. Наружная часть выполнена таким образом, что в нее может войти стержень с магнитами.

Стержень с магнитами формирует магнитное поле, величина которого зависит от того, насколько введен стержневой магнит. Корпус одним концом подключен к выводу магнитного соединения.

Оригинальное решение представлено в работе [9]. Предлагается использовать в составе амортизатора подвески автомобиля электрический генератор (рис. 4). Амортизатор имеет реечно-шестерёнчатый механизм, который преобразует линейное движение поршня во

вращательное движение ротора. Одностороннее вращение ротора при различном направлении движения колес обеспечивается двумя коническими шестернями, включенными через две обгонные муфты, имеющие противоположные по направлению механизмы замыкания, на одну ведомую шестерню, которая соединена с якорем генератора. Такая схема усложняет конструкцию, а применение обгонных муфт при ударных нагрузках в подвеске приводит к существенному снижению их ресурса. В работе выполнено моделирование процессов и представлены результаты исследований при использовании устройств на автомобиле.

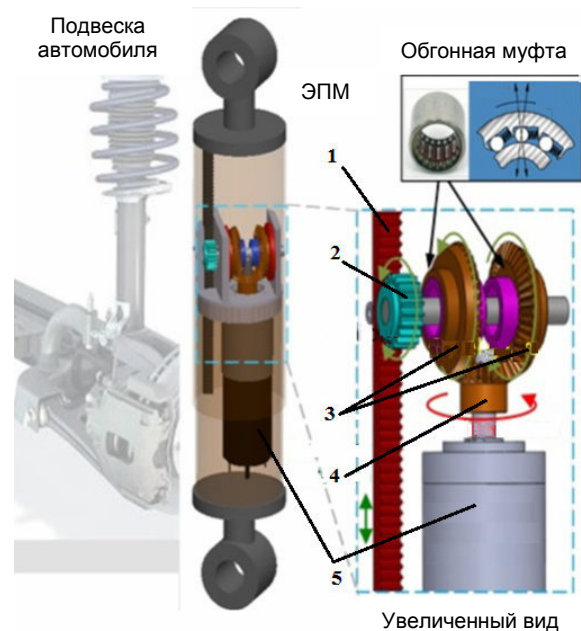


Рис. 4. Модифицированный электромеханический преобразователь-амортизатор: 1 – рейка; 2 – шестерня; 3 – ведущие конические шестерни; 4 – ведомая коническая шестерня; 5 – генератор

В работе [10] рассмотрен метод контроля колебаний подвески автомобиля с помощью управляемых электромеханических амортизаторов, активируемых с помощью генераторов энергии без использования внешнего источника питания. Вращательное движение ротора генератора усиливается передачей и активирует генератор для выработки электроэнергии. Сгенерированное напряжение при работе амортизатора экспериментально оценено по величине и частоте. Для оценки силы гашения колебаний с использованием регенерированного напряжения представлена модель. С помощью контроллера Skyhook создан и экспериментально ре-

реализован механизм уменьшения колебаний путем регенерирования энергии. Было экспериментально доказано, что при движении по неровной, волнистой дороге параметры подвески можно контролировать путем активации электроамортизаторов определенной величиной регенерированного напряжения.

Авторы работы [11] предлагают преобразовывать кинетическую энергию неподдресоренных масс, движущихся возвратно-поступательно по неровностям, во вращательное движение накопителя, которым могут быть маховик, компрессор с накопителем сжатого воздуха, генератор электрического тока с аккумулятором. Предложенное техническое решение обеспечивает, при изменении направления скорости движения масс, вращение привода накопителя в одном направлении. При этом следует отметить, что корпус накопителя крепится к остоу автомобиля.

При создании электрической машины использование устройства вращательного типа наиболее благоприятно, но сложность конструкции механической части увеличивает массу и повышает стоимость устройства.

Главной проблемой всех предложенных конструктивных решений является то, что они ни на шаг не продвинулись на пути к серийному внедрению в конструкцию автомобиля. Нерешенными проблемами являются: чрезмерные неподдресоренные массы, сложность конструкции, низкая надежность и быстродействие электроники, что особенно критично на плохих дорогах. В первую очередь такая ситуация обусловлена отсутствием в широком объеме теоретических и экспериментальных исследований динамики механической и электромагнитной систем при совместной работе, оценки их взаимодействия при различных параметрах и характеристиках, а также обоснования выбора конструктивных параметров оригинальных устройств.

Анализируя варианты конструкций ЭМП, их можно разделить на ротативные и линейные (рис. 5). Ротативная группа включает преобразователи: постоянного тока (ПТ), синхронный генератор с постоянными магнитами (СГПМ), вентильно-индукторный (ВИ), асинхронный (АС). Группа линейных преобразователей включает: индукторный (И) и синхронный линейный преобразователь с постоянными магнитами (СЛПМ).

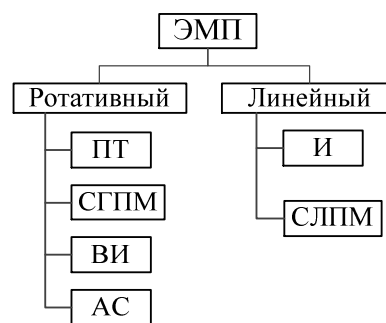


Рис. 5. Классификация ЭМП, которые могут быть использованы на транспортных средствах

Результаты анализа различных типов ЭМП представлены в табл. 2.

Таблица 2 Сопоставление результатов анализа ЭМП различных типов

Показатели	Типы преобразователей					
	ротативные				линейные	
	ПТ	СГПМ	ВИ	АС	И	СЛПМ
Коэффициент полезного действия (КПД)	+	+	-	0	-	+
Масса и габариты	-	0	-	0	0	+
Конструктивное исполнение	-	-	0	0	+	-
Механическая надежность	-	-	+	0	+	-

Примечание. Показатель: «+» – отличный, «0» – хороший, «-» – удовлетворительный.

Анализ условий работы, конструкций, схем преобразователей показал следующее:

- для рекуперации энергии колебательных масс подвески транспортного средства целесообразно использовать линейный электро-механический преобразователь;
- рационально использовать ЭМП с постоянными магнитами;
- на первых этапах создания наиболее приемлем трехфазный преобразователь.

Синхронный преобразователь с возбуждением от постоянных магнитов обеспечивает в генераторном режиме создание ЭДС без дополнительных источников реактивной мощности (конденсаторов). С другой стороны, этот тип ЭМП имеет самые высокие энергетические показатели: КПД и коэффициент мощности – $\cos\phi$, т.к. обладает постоянным

источником магнитного поля (постоянными магнитами).

Исходя из результатов сопоставления анализа конструкций различных типов ЭМП, был выбран вариант на основе синхронного линейного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов. Структурная схема системы подвески с ЭМП-амортизатором такого типа автомобиля представлена на рис. 6.

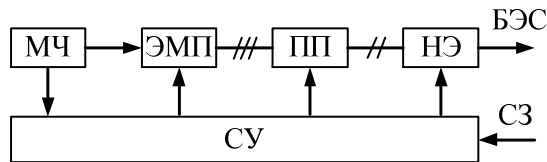


Рис. 6. Схема колебательной системы подвески с ЭМП-амортизатором: МЧ – механическая часть; ПП – полупроводниковый преобразователь; НЭ – накопитель энергии; БЭС – бортовая электрическая сеть; СУ – система управления; СЗ – сигнал задания

В работе проработан вариант компоновки ЭМП-амортизатора в переднюю подвеску легкового автомобиля ВАЗ (рис. 7) при максимальном использовании пространства и сохранении серийного упругого элемента подвески – пружины.

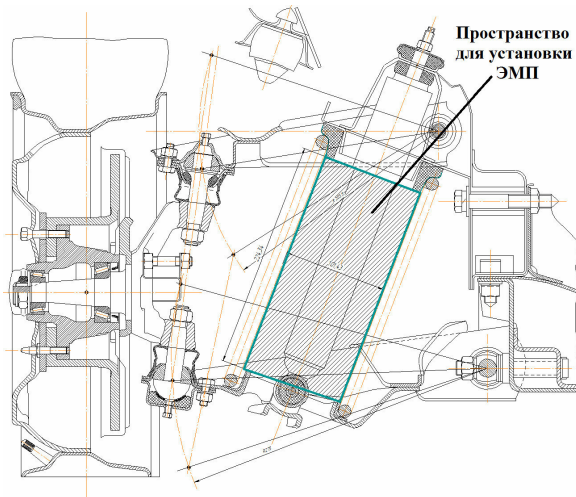


Рис. 7. Компоновка ЭМП-амортизатора на автомобиле ВАЗ внутри пружины

Предварительные расчеты и оценка показателей ЭМП-амортизатора показали, что геометрические ограничения уменьшают существенно его возможности и целесообразно размеры увеличить до максимума по условиям компоновки подвески или применить торсионную подвеску колеса (рис. 8).

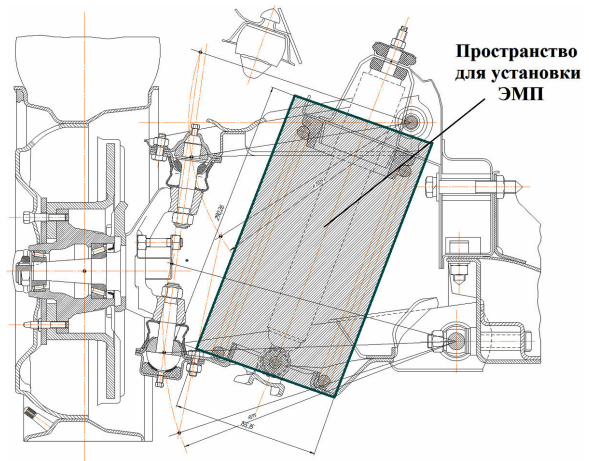


Рис. 8. Компоновка ЭМП-амортизатора на автомобиле ВАЗ при торсионной подвеске

В последнем случае пространство для размещения ЭМП-амортизатора возможно увеличить для рассматриваемой модели в 1,9 раза. 3D-модель предлагаемого устройства представлена на рис. 9.

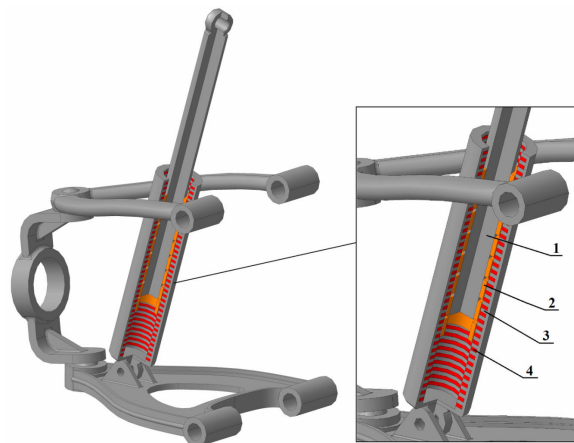


Рис. 9. 3D-модель основных элементов рычажной подвески автомобиля с ЭМП-амортизатором: 1 – ротор; 2 – постоянные магниты; 3 – корпус; 4 – катушки обмоток фаз

Для определения характеристик при принятых габаритах, а также конструктивной проработки ЭМП-амортизатора необходимо, используя компоновочный эскиз подвески, вписать в него конструкцию ЭМП-амортизатора, а затем, с использованием программного комплекса femm [12], провести цифровой эксперимент и получить значения потокосцеплений, величину магнитного поля и, в конечном итоге, определить значения силы взаимодействия ротора и статора. Максимальные значения этой силы должны быть

равны по величине силе демпфирования гидравлического амортизатора, широко используемого на автомобилях.

Выводы

На основании вышеизложенного можно сделать следующие заключения:

1. Проведенный аналитический обзор конструкций электромеханических преобразователей энергии транспортных средств подтвердил целесообразность и актуальность рассматриваемой задачи.

2. Анализ перспективных типов ЭМП показал, что наилучшими энергетическими показателями обладает преобразователь синхронного типа с возбуждением от постоянных магнитов.

3. Анализ конструкции подвески автомобиля ВАЗ классической компоновки показал:

– ЭМП, обладающий требуемыми массогабаритными и энергетическими показателями, для данного транспортного средства рационально выбрать линейного типа;

– применение линейного ЭМП позволяет исключить из системы подвески дополнительные механические элементы и снизить величину неподрессоренной массы автомобиля, что позволит снизить его динамическую нагруженность и повысить надежность рассматриваемого узла.

4. Выбранная структурная схема системы подвески с электроамортизатором – в виде линейного синхронного трехфазного ЭМП с возбуждением от постоянных магнитов – может быть использована в конструкции транспортного средства.

Литература

1. Говорущенко Н.Я. Системотехника автомобильного транспорта (расчетные методы исследований): монография / Н.Я. Говорущенко. – Х.: ХНАДУ, 2011. – 292 с.
2. Режим доступа: http://argent.fia.com/web/fia-public.nsf/1-2009_F1_technical_regulations_Showing-Alterations_17-03-2009.pdf «2009 Formula One Technical Regulations». FIA. December 22, 2006. Retrieved 2006-12-22.
3. Режим доступа: http://argent.fia.com/web/fia-public.nsf/1-2012_F1_technical_regulations_Showing-Alterations_23-12-2010.pdf «2012 Formula One Technical Regulations». FIA. December 23, 2010. Retrieved 2010-12-23.

4. Большая красная кнопка: маховики-накопители // Популярная механика [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.popmech.ru/article/6541-bolshaya-krasnaya-knopka/>.
5. Голованов Л. Bose мой / Л. Голованов // АвтоРевю. – 2011. – №12 (475). – С. 53–55.
6. Bose suspension system-white paper, Bose Company 2004. – Режим доступа: <http://www.bose.com/>.
7. Сергиенко А.Н. Имитационное моделирование гибридного автомобиля с последовательно-параллельным электроприводом силовой установки с синхронным электродвигателем с постоянными магнитами / А.Н. Сергиенко, Н.Е. Сергиенко, Б.Г. Любарский и др. // Вісник НТУ «ХПІ»: зб. наук. праць. Тематичний випуск «Транспортне машинобудування» – 2011. – №18. – С. 51–54.
8. Пат. WO 2012/015488 США, F16F15/03, F16F6/00. Electricity generating shock absorbers / Zuo Lei; Tang Xiudong; Zhang Pei Sheng. – № US2011/024699; заявл. 02.12.11; опубл. 02.02.12. – 28 с.
9. Lei Zuo. Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions / Lei Zuo, Brian Scully, Jurgen Shestani and Yu Zhou // Smart Materials and Structures. – 2010. – №19. – P. 1–11.
10. S-B Choi. Vibration control of an electrorheological fluid-based suspension system with an energy regenerative mechanism / S-B Choi, M-S Seong and K-S Kim // Journal of Automobile Engineering. – 2009. – April, Vol. 233. – P. 459–470.
11. Пат. України №93154. МПК F03G7/08, B60K 25/00. Пристрій для рекуперації енергії коливань транспортного засобу / Сергієнко М.С., Худолій А.І., Сергієнко А.М.; заявник і патентовласник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – № 200912230; заявл. 27.11.09; опубл. 10.01.11, Бюл. №1.
12. Режим доступа: <http://femm.berlios.de>.

Рецензент: В.И. Клименко, профессор, к.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 12 октября 2012 г.