

УДК: 629.11.02/98

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ  
СИСТЕМ РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ В ПОДВЕСКАХ  
КОЛЕСНЫХ МАШИН

Никонов В. О., Посметьев В. И.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова»

Email: 8888nike8888@mail.ru

Эксплуатация лесовозных автомобилей отличается крайне тяжелыми условиями к основным, из которых относятся: низкое качество лесовозных дорог, изобилующих ямами, глубокой колеей, препятствиями в виде пней, крупных камней, поверхностных корней и сучьев; значительными по величине поперечными и продольными уклонами; заболоченными участками; плохо просматриваемыми участками из-за крутых поворотов и густой зелени деревьев и кустарника, примыкающих к дороге. При наезде ходовой частью лесовозного автомобиля на препятствия возникают продольные и поперечные колебания. Известно, что для лесовозных автомобилей, движущихся по пересеченной местности, на колебания автомобиля расходуется до 30 % топлива, энергия которого, рассеивается через основные элементы подвески в форме тепла в окружающее пространство. В связи с постоянным ростом требований к экологичности и топливной экономичности лесовозного автомобиля, задача по рекуперации энергии в его подвеске является актуальной.



Рисунок 1 – Классификация механизмов рекуперации энергии используемых в подвесках колесных машин

Российскими и зарубежными разработчиками и изобретателями новых технических решений на сегодняшний день предложено огромное количество разнообразных по конструкции и типу механизмов рекуперации энергии в подвесках грузовых автомобилей. В большинстве случаев они разделяются на электрические, гидравлические и пневматические и инерционно-механические (рис. 1) [1]. Целью настоящей работы является анализ принципов работы существующих конструкций систем рекупераций энергии в подвесках колесных машин.

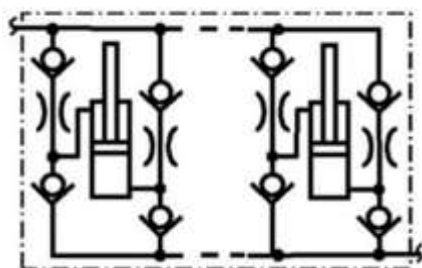


Рисунок 2 – Рекуперативный механизм подвески

В работе [2] приводится рекуперативный механизм подвески лесовозного автомобиля, работа которого основана на использовании энергии колебаний его рамы (рис. 2). Вследствие наезда колес на неровности штоки и поршни гидравлических цилиндров периодически совершают вертикальные возвратно-поступательные движения. Движение поршня сопровождается вытеснением части рабочей жидкости из нештоковой полости гидроцилиндра через дроссель и обратный клапан в напорную гидромагистраль, в результате чего подзаряжается пневмогидравлический аккумулятор.

Группа студентов из Массачусетского Технологического Института разработала конструкцию амортизатора, который, используя энергию, передаваемую подвеске при движении автомобиля от неровностей дорожного покрытия,



Рисунок 3 – Схема конструкции амортизатора

вырабатывает электроэнергию и более эффективно сглаживает удары в отличие от традиционных амортизаторов (рис. 3). В устройстве нового типа амортизаторов используется гидросистема, жидкость под воздействием ударов подвески о неровности дорожного покрытия проходит сквозь отверстия демпфера, приводя в действие турбину, соединенную с генератором электричества. Для управления работой этого амортизатора используется специализированный микропроцессорный блок управления, который позволяет оптимизировать режимы демпфирования, обеспечивая более плавную амортизацию движения автомобиля и вырабатывая электроэнергию, которая может использоваться для подзарядки батарей или снабжения энер-

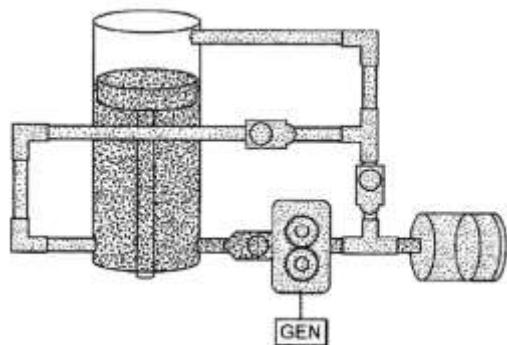


Рисунок 4 – Гидравлическая схема рекуперативного амортизатора GenShock

цилиндре при наезде на препятствие (рис. 4). Первый контур текущей среды связан с первой камерой в цилиндре в подпоршневом пространстве, сообщающийся по текущей среде с гидравлическим двигателем и по текущей среде с емкостным резервуаром. При сжатии поршня гидравлическая жидкость проходит через гидравлический двигатель, тем самым поворачивая его вал. Второй контур текущей среды сообщается по текущей среде со второй камерой и цилиндром в надпоршневой части, а также связан гидравлически с первой камерой. Электрический генератор подключается к валу гидравлического двигателя для выработки электроэнергии при его вращении.

В работе [5] приведена гидропневматическая рекуперативная система функционирования подвески. Она состоит из трех основных компонентов: гидравлического цилиндра, гидропневматического аккумулятора и гидравлической жидкости. Когда амортизатор подвергается внешнему воздействию от неровностей дороги, это усилие приводит к увеличению гидравлического давления внутри амортизатора и сжатию газа внутри аккумуляторов (рис. 5).

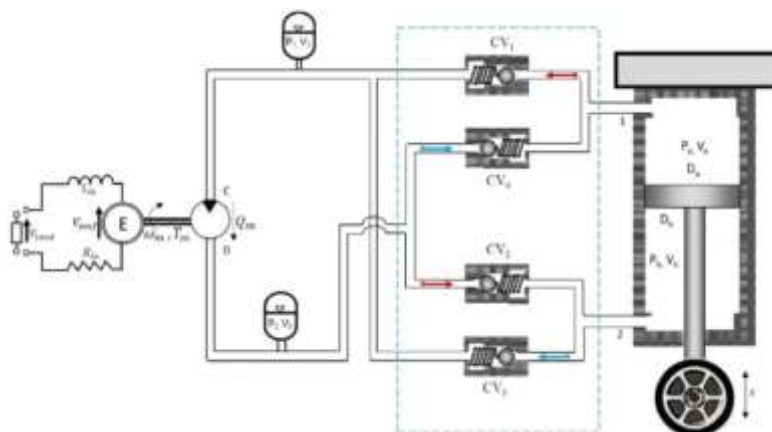


Рисунок 5 – Схема гидропневматической рекуперативной подвесочной системы

гией электрооборудования [3].

Компания Levant Power Corporation представила рекуперативный амортизатор GenShock [4]. Он представляет собой гидравлический поворотный амортизатор, преобразующий вертикальные движения поршня во вращательное движение гидравлического двигателя. Конструкция включает в себя поршень, предназначенный для возвратно-поступательного движения в

Компоненты, используемые для сбора энергии, включают в себя гидравлический двигатель, электромагнитный генератор, гидравлический выпрямитель и внешний нагрузочный резистор. Основная функция гидравлического выпрямителя поддерживать вращение гидравлического двигателя в одном направлении во время сжатия.

В статье [6] представлена гидравлическая схема работы рекуперативного амортизатора, состоящая из гидравлического цилиндра двойного действия, вып-

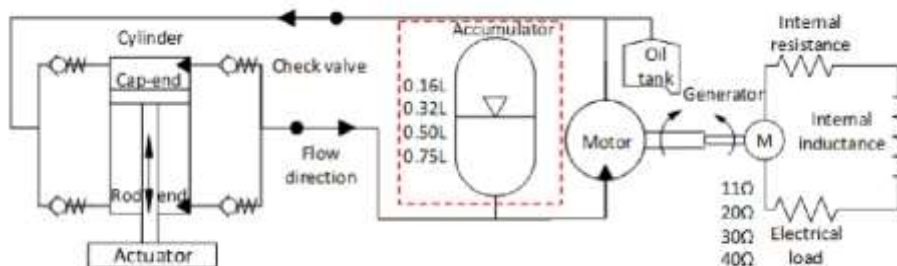


Рисунок 6 – Гидравлическая схема работы рекуперативного амортизатора

рямителя выполненного в виде четырех обратных клапанов, гидравлического аккумулятора, гидравлического двигателя, генератора, трубопроводов и масляного бака (рис. 6). Главным элементом системы является гидравлический цилиндр, который представляет собой традиционный амортизатор. Конец корпуса амортизатора прикреплен к неподвижной раме, а шток поршня соединен с гид-

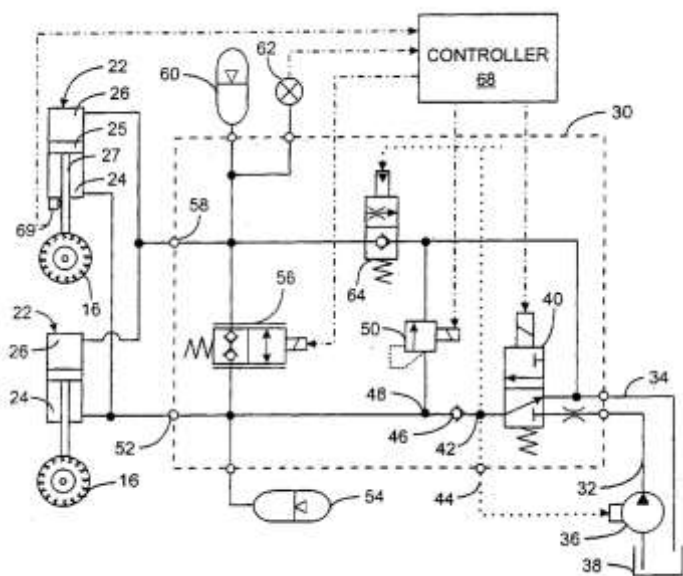


Рисунок 7 – Гидравлическая схема рекуперативной подвески транспортного средства по патенту EP1277604

равлическим приводом. Гидравлическая жидкость, как при сжатии, так и при разряжении проходит через гидравлический двигатель в одном направлении. Гидравлический двигатель непосредственно соединен с генератором через вал. Гидравлический двигатель преобразует линейное движение поршня во вращательное движение, которое приводит в действие генератор для производства электричества.

Известно устройство рекуперативной подвески, предназначенное для

внедорожных транспортных средств, содержащее поршень 25 разделяющий цилиндр 22 на надпоршневую 24 и подпоршневую 25 камеры, два гидравлических контура 20, обратный клапан 46, связанный через контур с гидравлическим насосом 36 и надпоршневой камерой, предохранительный клапан, два пневмогидравлических аккумулятора 54 и 60, электронный блок управления, гидробак 38 (рис. 7). Гидравлическая система работает либо в режиме рекуперации, либо в режиме двойного действия, в зависимости от давления в цилиндрах. Изменение массы груза, действующего на переднюю или заднюю часть транспортного средства, приводит к тому, что передняя часть транспортного средства опускается или поднимается относительно колес. При наезде передними колесами на препятствие штоки передних цилиндров втягиваются, а задних вытягиваются, перемещая вверх или вниз поршни и либо вытесняя гидравлическую жидкость из поршневых камер во второй пневмогидравлический аккумулятор, либо потребляя гидравлическую энергию из первого пневмогидравлического аккумулятора [7].

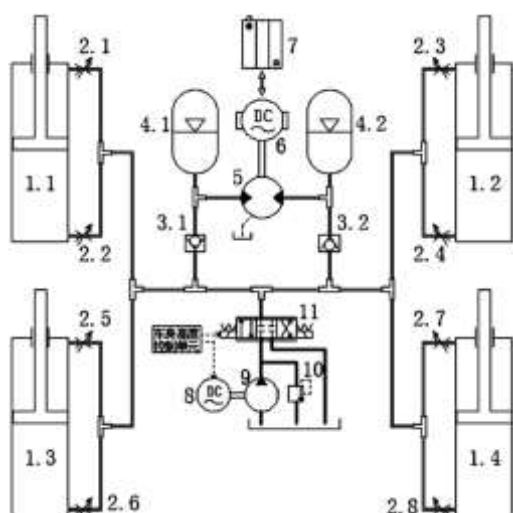


Рисунок 8 – Подвеска с рекуперацией энергии по патенту CN104476997

Известна подвеска с рекуперацией энергии, содержащая множество гидравлических цилиндров 1.1-1.4, отличающаяся тем, что подпоршневая и надпоршневая камеры гидроцилиндров соединены с гидравлической магистралью 2.1-2.8, которая взаимодействует с пневмогидравлическими аккумуляторами 4.1, 4.2 через обратные клапаны 3.1, 3.2, а основная гидромагистраль проходит через второй односторонний клапан и второй резервуар (рис. 8). Первый пневмогидравлический аккумулятор 4.1 и второй пневмогидравлический аккумулятор 4.2 соединены с

гидравлическим двигателем 5 и генератором 6 с аккумулятором 7 [8].

Известно устройство рекуперативной подвески, содержащее гидропривод, реверсивный клапан, устройство накопления энергии, гидравлический реверсивный клапан, цилиндр, поршень со штоком, разделяющий камеру цилиндра на первую и вторую части, устройство для выработки энергии, состоящее из гидравлического двигателя, соединенного с генератором. Когда шток перемещает поршень и сжимает гидравлическую жидкость в первой камере, она перетекает через управляющий масляный канал и клапан в накопитель энергии (рис. 9) [9].



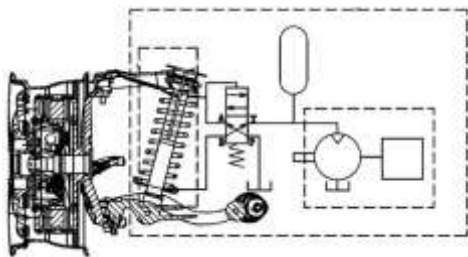


Рисунок 9 – Схема рекуперативной подвески по патенту CN205326733

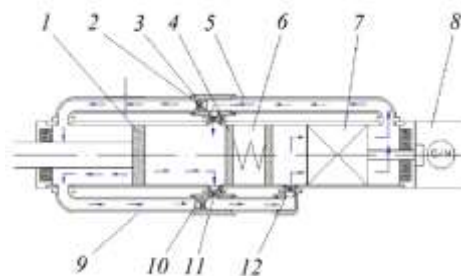


Рисунок 10 – Схема гидравлического амортизатора с рекуперацией электрической энергии

В работе [10] представлен гидравлический амортизатор с рекуперацией электрической энергии. Генератор приводится в движение гидравлическим двигателем и имеет постоянное направление движения. В процессе сжатия гидравлической жидкости поршнем 1 с пластиной 4 ее давление повышается, и она проходит через обратный клапан 11. Через клапан 12 рабочая жидкость достигает полости, генерирующей электрическую энергию, которая с помощью аккумулятора энергии 6 будет приводить в движение гидравлический двигатель 7, который в свою очередь будет приводить в действие электрический генератор 8 (рис. 10).

Известна рекуперативная подвеска автомобиля, содержащая гидравлический механизм, передающее устройство, вращающуюся электрическую машину и механизм накопления энергии (рис. 11). Гидравлический механизм включает в себя гидравлические цилиндры 1 и 2, обратные клапаны 3-10, аккумуляторы 11, 12, 14, энергетическое устройство 13, двигатели 15 и 16. При движении колес автомобиля по неровной поверхности, поршни гидравлических цилиндров перемещаются внутри цилиндров. Когда давление в верхних камерах гидравлических цилиндров 1 и 2 больше, чем давление в нижних камерах, рабочая жидкость поступает через обратные клапаны 4 и 7 к двигателям 15 и 16. Выходные валы гидравлических двигателей приводят в движение вал конической передачи, который связан с валом по-

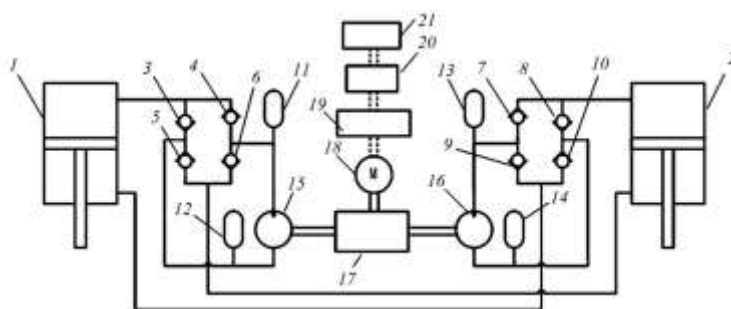


Рисунок 11 – Схема рекуперативной подвески по патенту CN 106183699

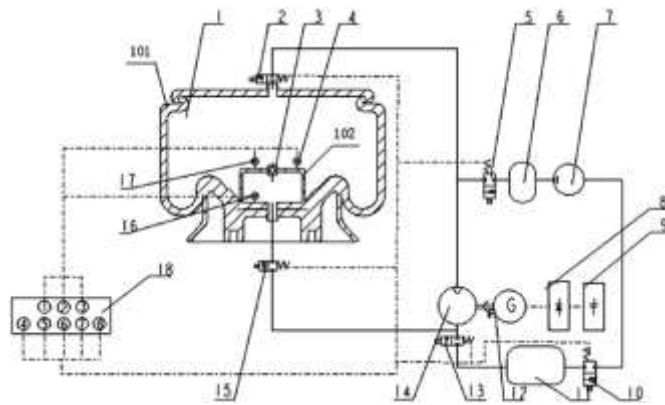


Рисунок 12 – Схема пневматической подвески с рекуперацией энергии по патенту CN 105346349

Основная пневматическая камера 101 и пневматический двигатель 14 соединены пневматической магистралью через пневматический клапан 2. Пневматический двигатель 14 соединен с устройством генерации энергии. Во время движения автомобиля датчики давления воздуха определяют давление воздуха в режиме реального времени в главной и вспомогательной пневматических камерах. Данные величины давлений анализируются электронным блоком управления и при давлении превышении давления воздуха в главной камере в сравнении с вспомогательной, он выдает сигнал на открытие электромагнитного клапана и сброса воздуха в пневмомагистраль для приведения в работу пневматического двигателя и последующего генерирования электрической энергии [12].

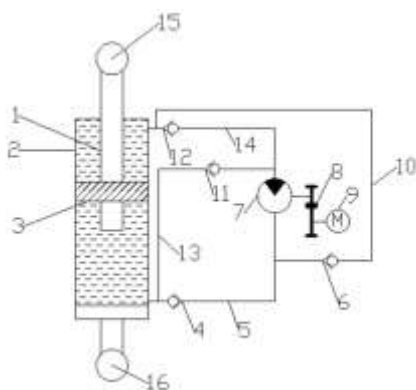


Рисунок 13 – Схема подвески транспортного средства с рекуперацией энергии по патенту CN 103009956

воротной электрической машины генерирующей электрическую энергию и подзаряжающей аккумуляторную батарею [11].

Известно устройство пневматической подвески с рекуперацией энергии, содержащее заслонку 1 пневматической рессоры, пневматический двигатель 14, устройство генерирования энергии и электронный блок управления 18. Заслонка 1 пневматической

Известно устройство подвески транспортного средства с рекуперацией энергии, содержащее гидравлический цилиндр 2, поршневой шток 1, поршень 3, обратные клапаны 4, 6, 11, 12, гидравлический двигатель 7, редуктор 8, двигатель для выработки электроэнергии 9, гидромагистрали высокого давления 5, 10, 13, 14, крепления гидравлического цилиндра 15, 16 (рис. 13). При наезде транспортного средства на неровности дорожного покрытия, давление рабочей жидкости в верхней камере гидравлического цилиндра увеличивается, и она пере-

текает из нее через обратный клапан 12 по гидромагистрали высокого давления 14 в гидравлический двигатель 7, тем самым приводя в работу через зубчатую передачу 8 двигатель 9 для выработки электроэнергии [13].

Потенциальные возможности по улучшению виброзащитных свойств в подвесках с гидравлическими механизмами рекуперации энергии в подвесках транспортных средств, практически исчерпаны. Связано это с их недостатками, основными из которых являются: трудоемкость изготовления пары трения поршень-цилиндр, необходимость уплотнения зазора между поршнем и стенкой цилиндра; трудоемкость изготовления штока поршня, необходимость уплотнения зазора между штоком поршня и направляющей; вспенивание рабочей жидкости; кавитация; зависимость свойств рабочей жидкости от рабочей температуры, инерционность рабочей жидкости. Наиболее совершенными в сравнении с гидравлическими механизмами, являются инерционно-механические механизмы рекуперации энергии в подвеске транспортного средства. Сравнительные испытания показали, что данный тип механизмов позволяет получить идеальную АЧХ колебаний подвески и существенно повысить плавность хода транспортного средства. При этом инерционно-механические механизмы рекуперации представляют собой простые механические конструкции, стоимость которых соизмерима и может быть ниже стоимости производства существующих гидравлических механизмов рекуперации [14].

Компания Audi представила инновационную подвеску, которая получила название eROT (рис. 14). В ее конструкции к нижним рычагам прикрепляется специальный генератор. В него интегрированы шестерни, которые начинают вращаться при движении рычагов, что происходит во время прохождения неровностей. Мощность выработки энергии зависит от количества ям: от 3 Вт на идеально гладком шоссе до 613 Вт на проселочных дорогах. В среднем может



Рисунок 14 – Схема подвески eROT

получиться около 100-150 Вт. Генератор должен быть подключен к 48-вольтовой бортовой энергосистеме. На данный момент такая подвеска присутствует только в двух автомобилях немецкого концерна Audi SQ7 и Bentley Bentayga. В перспективе электрическая система с напряжением 48 В может появиться в гибридных и электрических моделях, в том числе в Audi Q6. По данным инженеров Audi, техноло-



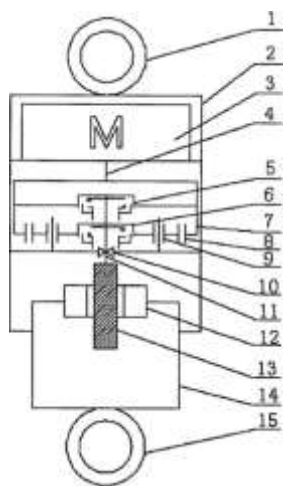


Рисунок 15 – Устройство рекуперативной подвески по патенту CN201712474

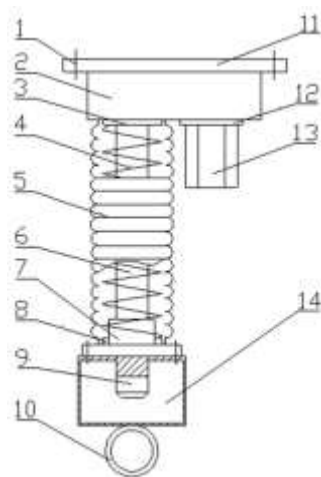


Рисунок 16 – Устройство рекуперативной подвески по патенту CN 105172593

гия eROT позволит снизить уровень выбросов углекислого газа на 3 г/км [15].

Известно устройство для рекуперации энергии вибрации в подвеске автомобиля, содержащее верхние 2 и нижние 14 рабочие цилиндры взаимодействующие друг с другом, шаровый винт 13 и гайку 12, расположенные между верхними 2 и нижними 14 рабочими цилиндрами, электродвигатель, шариковый винт 13, снабженный двумя обратными односторонними муфтами 5 и 6 (рис. 15). Одна муфта 5 жестко соединена с передающим элементом 7, а другая 6 проходит через планетарную передачу 9. При наезде колес автомобиля на препятствие рабочие цилиндры 2, 14 перемещаются вверх и вниз. Это перемещение на винтовой гайке 12 заставляет шаровый винт 13 поочередно вращаться по часовой и против часовой стрелки. Поскольку шаровый винт 13 связан с двумя обратными односторонними муфтами 5 и 6 и передающим элементом 7, направление вращения передающего элемента 7 всегда будет одинаковое [16].

Известно устройство рекуперативной подвески, содержащее болты 1, коробку передач 2, верхнюю опору 3 пружины, амортизационную пружину вибрации 4, резиновую наружную крышку 5, шариковый винт 6, винтовую гайку 7, опору 8, резиновый буферный блок 8, монтажное отверстие 10, монтажное основание 11, монтажный фланец 12, двигатель 13, рабочую камеру 14 (рис. 16). Во время наезда колес транспортного средства на препятствие, возникающая линейная вибрация корпуса подвесной части преобразуется во вращательное движение шарового винта 6 соединенного с коробкой передач 2 и двигателем 13. В соответствии с принципом электромагнитной индукции двигатель 13 будет генерировать электрическую энергию, которая будет накапливаться в аккумуляторной батарее [17].

Известна подвеска транспортного средства с рекуперацией энергии, содержащая ступицу 4, колесо 2, верхний передний рычаг 6, верхний задний рычаг 8,

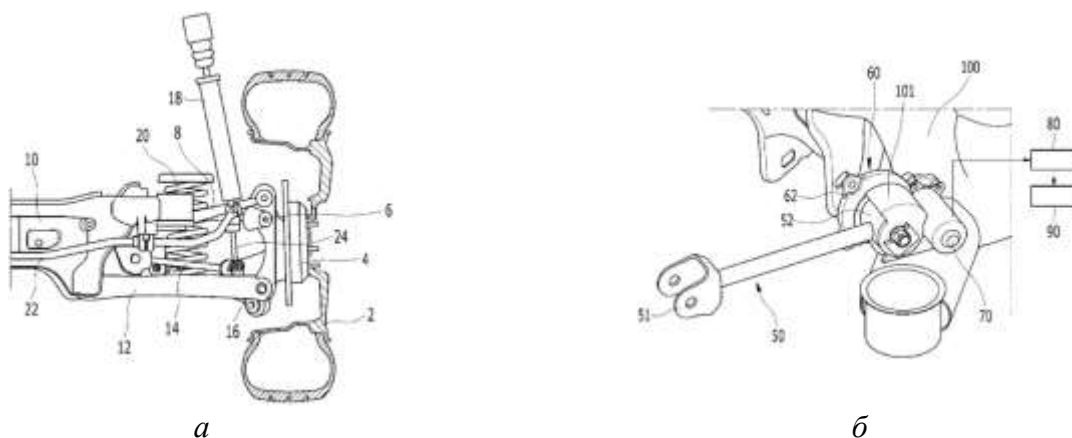
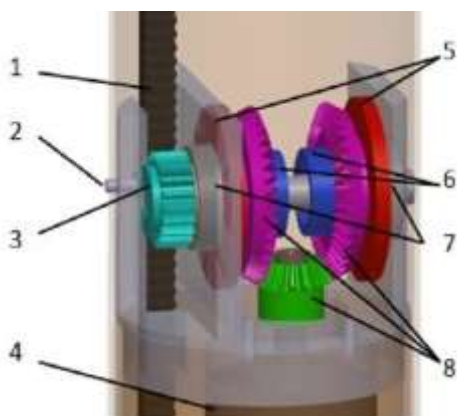


Рисунок 17 – Схема рекуперативной подвески транспортного средства *a* и устройства для извлечения электрической энергии *б* по патенту CN102529626

корпус транспортного средства *10*, нижний рычаг *12*, вспомогательный рычаг *14*, продольный рычаг *16*, амортизатор *18*, пружину *20*, стабилизатор *22*, соединительный стержень *24* (рис. 17). Устройство для извлечения энергии включает в себя рычаг подвески *50*, преобразователь поворота *60*, генератор *70*, выпрямитель *80* и аккумулятор *90*. Преобразователь поворота *60* соединен с корпусом транспортного средства *100* рычагом *50* подвески. При наезде транспортного средства на препятствие рычаг периодически перемещается вверх и вниз. Муфта *52* преобразует эти перемещения в однонаправленное вращение вала генератора *70*, вырабатывающего электрическую энергию для хранения в аккумуляторной батарее [18].

В работе [19] представлен механизм MMR (mechanical motion rectifier) энергосберегающего амортизатора, способный



1 – стойка; 2 – ролик; 3 – шестерня;  
4 – планетарный редуктор; 5 – упорный подшипник; 6 – роликовая муфта;  
7 – шариковый подшипник;  
8 – конические шестерни

Рисунок 18 – Схема устройства механизма MMR

восстанавливать энергию, рассеиваемую при колебаниях подвески (рис. 18). Данный механизм позволяет переводить энергию колебательного движения подвески «вверх-вниз» в однонаправленное вращение генератора с целью производства электроэнергии. Использование данного механизма в амортизаторах легковых автомобилей позволяет сохранить от 100 до 400 Вт, в грузовых от 1 до 10 кВт.

В работе [20] представлен рекуперативный амортизатор, который состоит из высокоэффективного преобразователя дви-

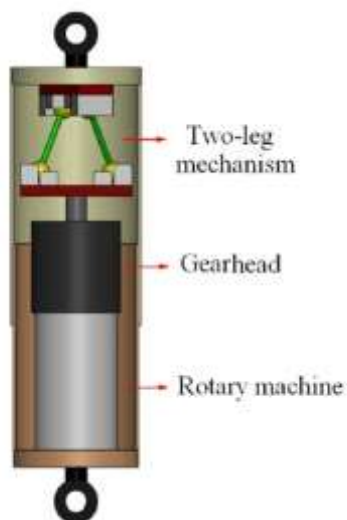
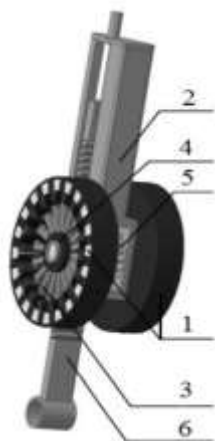


Рисунок 19 – Схема рекуперативного амортизатора



- 1 – генераторы, 2 – корпус,  
3 – роторы генератора,  
4 – обгонная муфта,  
5 – мультипликатор,  
6 – зубчатая рейка

Рисунок 20 – Схема электромагнитного амортизатора

жения – двух рычажного механизма, редуктора, бесщеточной роторной машины с постоянным магнитом. Рычажный механизм состоит из двух ножек и бесколлекторного бесконтактного ротационного автомата (рис. 19). Преобразователь движения преобразует поступательное движение, вызванное неровностями дороги во вращательное движение. Затем планетарный редуктор увеличивает амплитуду вращательного движения, что приводит к более высокому напряжению на выходе генератора. Далее генератор осуществляет зарядку батареи.

В политехническом институте Сибирского федерального университета ведется разработка электромагнитного амортизатора вращательного типа, который способен преобразовать энергию колебаний в электрическую для передачи ее в бортовую сеть автомобиля, адаптировать подвеску к условиям движения транспортного средства и обеспечить ее работоспособность без отбора энергии из бортовой сети (рис. 20) [21].

В статье [22] приводятся схемы инерционно-фрикционных амортизаторов с различными механизмами преобразования возвратно-поступательного движения во вращательное. Первое устройство для преобразования движения в виде передачи «винт-гайка», работает следующим образом (рис. 21). При относительных перемещениях опор 2 и 10, имеющих место при движении транспортного средства, полый шток 9 с гайкой 8 перемещаются относительно корпуса 1 и винта 7, который вследствие взаимодействия с гайкой 8 вращается вокруг своей

оси в подшипнике 6. Вместе с винтом 7 вращается и фрикционный диск 11, поджатый к нижнему торцу цилиндра 5 маховика пружиной 12. Момент трения возникает между фрикционным диском 11 и цилиндром 5. Если момент трения больше инерционного момента цилиндра 5, что имеет место при низких частоте-

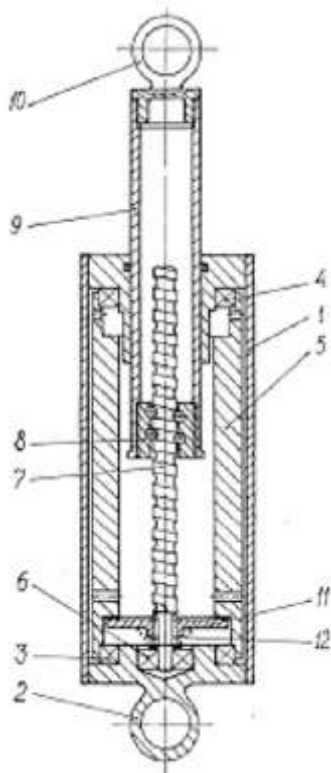


Рисунок 21 – Амортизатор с винтовой передачей

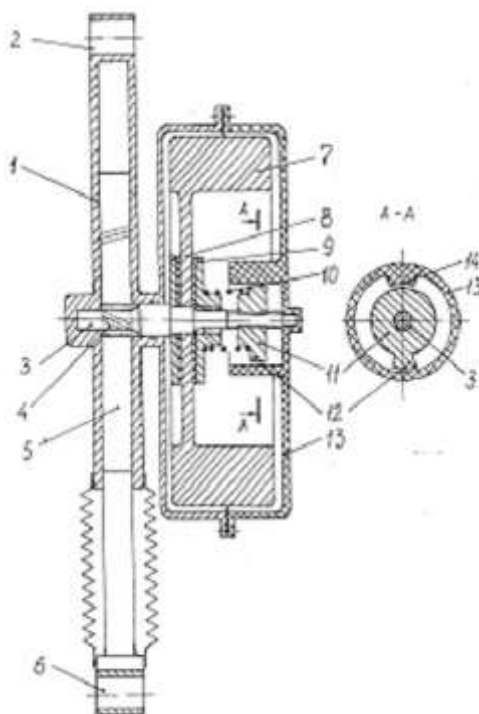


Рисунок 22 – Амортизатор с реечной передачей

тах, то последний вращается заодно с винтом 7 и осуществляет рекуперацию энергии колебаний, накапливая кинетическую энергию при разгоне и отдавая ее при торможении с изменением направления действия осевой силы. Во втором устройстве при относительных перемещениях опор 2 и 6, имеющих место при движении транспортного средства, зубчатая рейка 5 перемещается относительно картера 1 и вращает шестерню 4 с валом 3 (рис. 22). Вместе с валом 3 вращаются фрикционные диски 8 и 9, поджатые к торцам маховика 7 пружиной 10. Момент трения возникает между фрикционными дисками 8 и 9 и маховиком 7, что имеет место при низких частотах, последний вращается заодно с валом 3 и осуществляют рекуперацию энергии колебаний, накапливая кинетическую энергию при разгоне и отдавая ее при торможении с изменением направления действия силы.

Рассмотренные выше конструкции инерционно-механических механизмов рекуперации энергии в подвесках транспортных средств в настоящее время не позволяют заменить существующие гидравлические механизмы. Связано это с большими габаритами и массой маховика для реечного механизма, усложняющих его компоновку в подвеске транспортного средства; со сложностью изготовления шариково-винтовой передачи для винтового механизма, требуемой точности, использования особых материалов и сплавов.

Учитывая, что основным видом энергии в электро и гибридных силовых установках является электричество, то первая группа устройств рекуперации энергии в подвесках более предпочтительна. В отличие от двух дру-





Рисунок 23 – Схема активной подвески с рекуперацией энергии

местной разработки первой в мире активной подвески, оснащенной возможностью рекуперации энергии (рис. 23). Стороны намерены сделать эту технологию приемлемой по цене и доступной для массового производства. Система рекуперативной подвески будет состоять из небольшого электродвигателя, собственного электронного блока управления и электрогидравлического шестеренчатого насоса. Насос, установят на каждом колесе снаружи амортизатора. Насосы будут автоматически регулировать давление масла в каждом амортизаторе, подстраивая их работу под дорожные условия. Для рекуперации энергии будет использоваться возвратно-поступательное движение штока амортизатора. Кинетическая энергия будет преобразована в электрическую и затем направлена в общую электроцепь автомобиля [23].

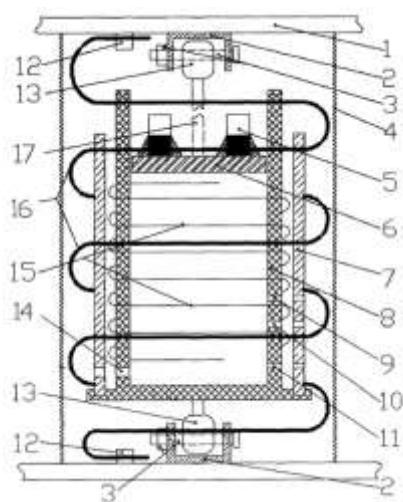


Рисунок 24 – Схема амортизатора с рекуперацией энергии по патенту CN 202764638

гих групп здесь не требуется трансформация энергии из одного вида в другой, что в конечном итоге упрощает конструкцию и удешевляет производство электро и гибридных автомобилей. К большой группе электрических устройств рекуперации энергии в подвесках можно отнести: электромагнитные, с постоянными магнитами, электромашинные, линейные, пьезокерамические.

Немецкая компания ZF и американская Levant Power объявили о начале совместной разработки первой в мире активной подвески, оснащенной возможностью рекуперации энергии (рис. 23). Стороны намерены сделать эту технологию приемлемой по цене и доступной для массового производства. Система рекуперативной подвески будет состоять из небольшого электродвигателя, собственного электронного блока управления и электрогидравлического шестеренчатого насоса. Насос, установят на каждом колесе снаружи амортизатора. Насосы будут автоматически регулировать давление масла в каждом амортизаторе, подстраивая их работу под дорожные условия. Для рекуперации энергии будет использоваться возвратно-поступательное движение штока амортизатора. Кинетическая энергия будет преобразована в электрическую и затем направлена в общую электроцепь автомобиля [23].

Известен амортизатор автомобильной подвески с рекуперацией энергии, основанный на хранении электрической и гидравлической энергии, в состав которого входит блок гидравлического цилиндра 9, поршень гидравлического цилиндра 7, амортизирующая пружина 17, индукционная катушка, внешняя крышка цилиндра 8, резиновая пылезащитная крышка 5, соединительные болты 4, пружинные зажимы 13, U-образные скобы 3, постоянные магниты 6 (рис. 24). Когда подвеска автомобиля перемещается вверх или вниз, приводятся в движение поршни в гидравлических цилиндрах, генери-



руя в катушке индуктивности электрический ток. Катушка индуктивности подключена к аккумуляторной батарее автомобиля для накопления и хранения электрической энергии. Одновременно с накоплением электрической энергии в результате вибрирования подвески происходит сжатие рабочей жидкости, которая через гидравлические магистрали под давлением отводится на хранение в пневмогидравлический аккумулятор [24].

В работе [25] представлен электромагнитный амортизатор с рекуперацией энергии, состоящий из линейного генератора и постоянного магнита. Основным отличием его является новое расположение катушек перпендикулярно оси заслонки и установка магнитов с обратной осью намагничивания.

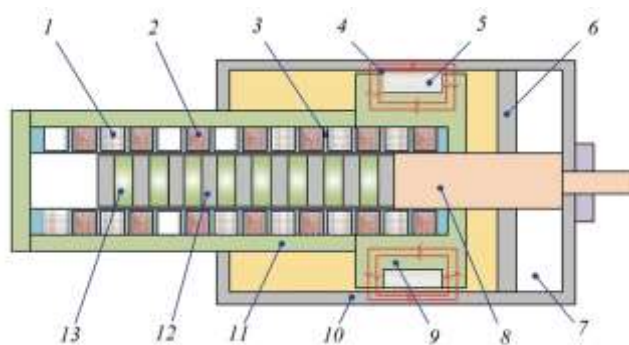


Рисунок 25 – Рекуперативный амортизатор с магнитореологической жидкостью

В работе [26] предлагается схема амортизатора с магнитореологической жидкостью и с возможностью сбора энергии. Магнитореологическая заслонка состоит из демпфирующей части и линейной части генератора. В демпфирующей части цилиндра 10 две камеры, которые разделены плавающим поршнем 8 (рис. 25). Камера с поршнем 9 заполнена магнитореологической жидкостью, а вторая часть используется в качестве аккумулятора 7 для компенсации изменения объема, когда шток поршня 11 перемещается вертикально вдоль направления вибрации. Когда шток поршня 11 перемещается магнитореологическая жидкость в цилиндре протекает через кольцевой зазор 4. Катушка возбуждения 5 намотанная вокруг поршневой головки 9 электрически изолирована. Когда на катушку возбуждения 5 подается постоянный ток, вокруг катушки возбуждения 5 и поршневой головки 9 генерируется магнитное поле, приводящее к изменению вязкости магнитореологической жидкости и активации кольцевого зазора 4. Линейный генератор энергии расположен в радиальном направлении внутри каждой заслонки. Каждые два постоянных магнита 13 разделены распоркой 12 и сгруппированы в пару полюсов. Индукционные катушки 1 и 2 расположены на основании обмотки 3. В процессе взаимодействия между постоянными магнитами и индуцирующими катушками, энергия вибрации преобразуется в электричество.

В статье [27] предложена гибридная рекуперативная система, включающая

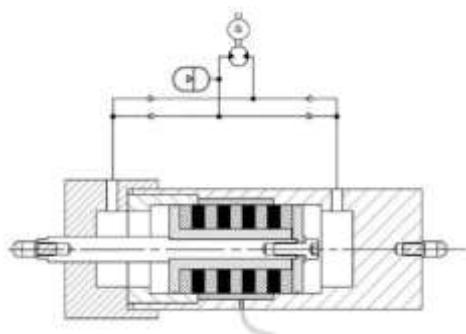


Рисунок 26 – Схема рекуперативного амортизатора

комбинированные гидравлические и электромагнитные конструкции. Амортизатор состоит из двух основных частей проводника и транслятора. Проводник включает в себя цилиндр и катушки, а транслятор стержневой поршневой механизм, выполненный из постоянных магнитов и полюсов (рис. 26). Гидравлический контур содержит аккумулятор, который стабилизирует мгновенные нагрузки и сохраняет масло в объеме, как правило, равном изменению объема стержня. Статор амортизатора содержит обмотки, представляющие цилиндрические катушки. Стержень содержит постоянные магниты.

В статье [28] представлена электромагнитная подвеска с возможностью рекуперации энергии (рис. 27). Она состоит из двух электромагнитов, расположенных внутри цилиндра. Один электромагнит установлен в верхней части цилиндра и неподвижен, другой, расположенный в нижней части цилиндра является подвижным. Пружина прикреплена к подвижному концу реостата с возможностью перемещаться в исходное положение. Штанга одним концом прикреплена к подвижной части реостата, а другим к оси колеса. Ток передается электромагнитам, между которыми возникает сила отталкивания. Реостат используется для изменения тока по мере необходимости. По мере увеличения сопротивления ток уменьшается и наоборот. При наезде колеса на препятствие, стержень, прикрепленный к оси, соединенный с реостатом, изменяет сопротивление, тем самым изменяя ток и контролируя силу отталкивания между электромагнитами.

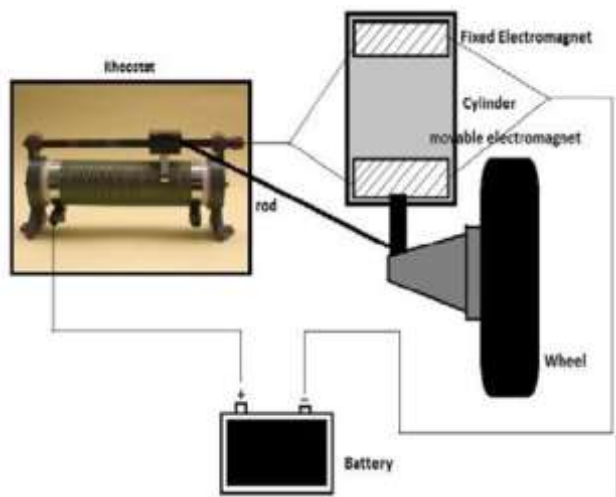


Рисунок 27 – Схема электромагнитной подвески с рекуперацией энергии

Рисунок 27 – Схема электромагнитной подвески с рекуперацией энергии

В статье [29] предложен электромагнитный амортизатор с шариковым винтом, используемый для рекуперации энергии. Электромагнитный амортизатор состоит из двигателя постоянного тока, шарикового винта и гайки (рис. 28). Линейные движения системы демпфирования вызванная при наезде колесом на препятствие преобразуются во вращательное движение с помощью шарикового винта и

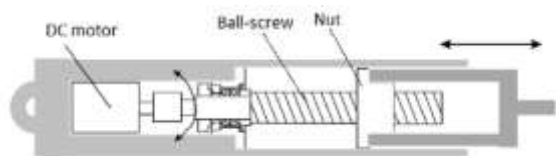


Рисунок 28 – Схема электромагнитного аккумулятора с рекуперацией энергии

гайки. Вращательное движение, переданное двигателю индуцируется в напряжении, которое генерирует ток и после накапливает его в электрическом двухслойном конденсаторе.

В работе [30] представлен рекуперативный амортизатор, который состоит из постоянных магнитов и катушек.

Внутренний слой силовой части прикреплен к движущемуся штоку (рис. 29). Перемещение относительно друг друга внутреннего и внешнего слоя вызывают

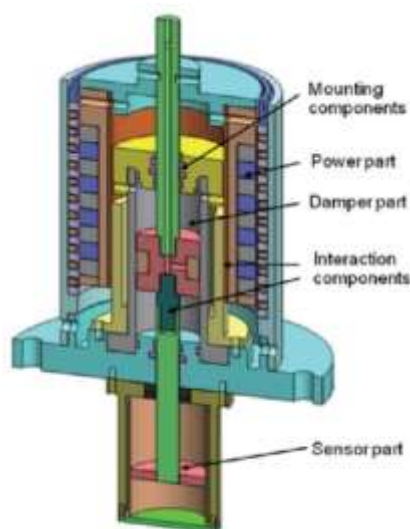


Рисунок 29 – Поперечное сечение рекуперативного амортизатора MR

изменение магнитного поля, которое в свою очередь генерирует электроэнергию. Часть штока состоит из катушки и намагниченного кольца. Когда шток перемещается, он генерирует изменение в магнитной цепи. Движение штока будет генерировать электрическое напряжение в катушке, которое будет пропорционально скорости штока. Изменяя напряжение можно изменять скорость движущегося штока. Демпфирующая способность достигается магнито-реологической жидкостью, расположенной в демпфирующей части.

В работе [1] представлена перспективная конструкция электрического амортизатора-рекуператора с высокими эксплуатационными свойствами. Принцип действия данной конструкции основан на известном эффекте возникновения электрического тока в обмотке катушки при

возвратно-поступательном движении якоря из постоянного магнита (рис. 30). С целью повышения эффективности генератора в зазор между катушкой и постоянным магнитом введена магнитная жидкость, которая надежно удерживается в зазоре при работе устройства самим магнитом.

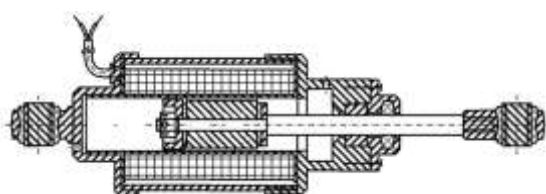


Рисунок 30 – Схема конструкции линейного электромагнитного генератора для подвески автомобиля

В результате экспериментальной проверки данного устройства было выявлено, что увеличение массы перевозимого груза и скорости движения автомобиля производство электрической энергии устройством

существенно повышается. Готовая к применению система активной подвески на базе линейной электрической машины представлена компанией Bose.

Из перечисленных, наиболее перспективны электрические устройства рекуперации энергии на основе линейных генераторов. Приемлемыми также по эксплуатационным свойствам и конструктивному исполнению являются устройства электрического типа – электромагнитные и с постоянными магнитами. Такие устройства достаточно эффективны, просты по конструкции, дешевые в производстве, надежны в работе и легко компонуются во всех типах подвесок транспортных средств.

Рост требований к экономичности и экологичности предполагает применение новых способов и конструктивных решений по накоплению и использованию энергии в колесных транспортных средствах. Рассеиваемая энергия колебаний в амортизаторах подвески колесного транспортного средства также относится к неэффективному использованию энергетических ресурсов. Поэтому разработка новых способов и конструктивных решений, связанных с рекуперацией энергии в подвесках колесных транспортных средств является важной задачей. Рассмотренные выше конструктивные решения позволяют не только снизить потери энергии при работе подвески и накапливать различного вида энергию, но и получить возможность активного ее регулирования.

Несмотря на большой вклад российских и зарубежных ученых в создание конструктивных решений, связанных с рекуперацией разного вида энергии в подвесках колесных транспортных средства, результаты этих разработок по причине специфических особенностей эксплуатации различных транспортных средств нельзя механически применять на все транспортные средства. К настоящему времени все еще отсутствуют удовлетворительные схемные решения и научные подходы, направленные на рекуперацию энергии в подвесках лесовозных автомобилей. Причиной этому являются повышенные трудности решаемых задач, недостаточные масштабы и глубина исследований по обоснованию конструктивных и рабочих параметров рекуперативных систем лесовозных автомобилей, с учетом технологических особенностей выполняемых работ. В этой связи, проводимые в ВГЛТУ исследования в рассматриваемом направлении являются своевременными и актуальными.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Посметьев, В. И. Оценка эффективности применения системы рекуперации энергии в подвеске автомобиля [Текст] / В. И. Посметьев, М. В. Драпалюк, В. А.

Зеликов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, 2012. – № 76. – С. 559-573.

2 Посметьев, В. И. Повышение эффективности лесовозного автомобиля с помощью рекуперативного гидропривода [Электронный ресурс] / В. И. Посметьев, В. О. Никонов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2017. – № 131(07).

3 GenShock – система подвески, выполняющая функцию регенерации энергии [Электронный ресурс]. Режим доступа : <https://www.drive2.ru/c/668092/>. – Загл. с экрана.

4 Shakeel N. Avadhany analysis of hydraulic power transduction in regenerative roary scock absorbers as function of working fluid kinematic viscosity // S. B. Materials Science. Engineering Massachusetts Institute of Technology, 2009. – 29 p.

5 Magdy N., Mohamed Ib. Sokar, Saber A. Rabbo, M. E. El-Arabi Performance Evaluation and Damping Characteristics of HydroPneumatic Regenerative Syspension System // International Journal of Applied Engineering Research, Volume 13, Number 7 (2018). – pp. 5436-5442.

6 Ruichen Wang, Fengshou Gu, Robert Cattley, Andrew D. Ball Modelling, Testing and Analysis of a Regenerative Hydraulic Shock Absorber System // Energies 2016, 9, 386. – 24 p.

7 Патент на изобретение 1277604 EP, МПК В60G 17/04. Dual mode regenerative suspension for an off-road vehicle [Текст] / Rogala Jeffrey A, Greisbach Eric N ; заявитель и патентообладатель Husco int inc – № 2254219 ; заявл. 17.06.2002 ; опубл. 22.01.2003.

8 Патент на изобретение 104476997A CN, МПК В60G 13/18. Система подвески гидравлической энергии [Текст] / Чжоу Чжуанхуэй, Вэнь Гуйлинь ; заявитель и патентообладатель Хунаньский университет – № 201410834241 ; заявл. 29.12.2014 ; опубл. 01.04.2015.

9 Полезная модель 205326733 CN, МПК В60G 13/14. Система восстановления энергии вибрации и система подвески колес с ней [Текст] / Чжу Андинг; заявитель и патентообладатель Сучжоу Yigao Electric Vehicle Manufacturing Co., Ltd. – № 205326733 ; заявл. 15.01.2016 ; опубл. 22.06.2016.

10 Xu Lin, Guo Xuxun Hydraulic transmission electromagnetic energy-regenerative active suspension and its working principle // In : 2010 2<sup>nd</sup> International workshop on Intelligent systems and applications, 2010.

11 Патент на изобретение 106183699A CN, МПК F15B 21/14. Energy-regenerative suspension for car and control method thereof [Текст] / Ван



РуохонDing YanqiДин РенкайМэн СянпенгСе ЦзяньЧэнь Лонг ; заявитель и патентообладатель Университет Цзянсу – № 201610653937 ; заявл. 10.08.2016 ; опубл. 07.12.2016.

12 Патент на изобретение 105346349В CN, МПК В60G 13/14. An air suspension system and method for energy recovery [Текст] / Сюй СинЛу ШаньфэнЧэнь ЛонгСунь СяоцянЦзян ХаобинВан РуохонЛи Сяньбо ; заявитель и патентообладатель Университет Цзянсу – № 201510802454 ; заявл. 19.11.2015 ; опубл. 07.06.2017.

13 Патент на изобретение 103009956А CN, МПК В60G 17/08. Устройство для хранения энергии с восстановлением энергии вибрации [Текст] / Ван РуохонSun ZeууЧэнь БинРен ХаоShen Yujie ; заявитель и патентообладатель Университет Цзянсу – № 2012105861455 ; заявл. 31.12.2012 ; опубл. 03.04.2013.

14 Воробьев, В. В. Совершенствование конструкционных параметров инерционно-фрикционного амортизатора подвески АТС [Текст] / В. В. Воробьев // автореф. дисс. на соиск. учен. степен. канд. техн. наук по спец. 05.05.03, 2006. – 21 с.

15 Audi создала систему получения электричества от кочек на дорогах [Электронный ресурс]. Режим доступа : <https://www.drive2.com/c/452491916-857049312/>. – Загл. с экрана.

16 Полезная модель 201712474 CN, МПК В60К 25/10. Устройство для восстановления энергии подвески автомобилей [Текст] / Ло Вэй; заявитель и патентообладатель Ло Вэй – № 2010202309638 ; заявл. 21.06.2010 ; опубл. 19.01.2011.

17 Патент на изобретение 105172593А CN, МПК В60К 25/10. Подвеска для восстановления энергии вибрации [Текст] / ГуанканСюй Цзюнь Чэнь Цзянь Цао Бинган ; заявитель и патентообладатель Хэнань Speeda Electric Vehicle Technology Co., Ltd. – № 201510605902 ; заявл. 22.09.2015 ; опубл. 23.12.2015.

18 Патент на изобретение 102529626 CN, МПК В60G 13/14. Energy regeneration device of suspension system for vehicle [Текст] / Li Yanqiu ; заявитель и патентообладатель Hyundai Motor Co., Ltd – № 2011103353463 ; заявл. 28.10.2011 ; опубл. 04.07.2012.

19 Zhongjie Li, Lei Zuo Energy-harvesting shock absorber with a mechanical motion rectifier // Smart Materials and Structures, 2012, – 15 p.

20 Amir Maravandi Design and Implementation of a Regenerative Shock Absorber // Thesis Submitted in Partical Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, 2015. – 124 p.

21 Зеер, В. А. Возможность применения электромагнитного генератора вращательного типа в качестве демпфера подвески автомобиля [Текст] / В. А. Зеер, А. А.Сорокин, Д. Л. Окладников // Труды IV международной научно-технической конференции, 2015. – С. 181-187.

22 Рябов, И. М. Экспериментальные исследования инерционно-фрикционных демпферов в системах подвешивания транспортных средств [Текст] / И. М. Рябов и др. // Вестник ИрГТУ № 2(42), 2010. – С. 146-154.

23 Для автомобилей разработают рекуперативную подвеску [Электронный ресурс]. Режим доступа : <https://motor.ru/news/zfpower-28-08-2013.htm>. – Загл. с экрана.

24 Патент на изобретение 202764638 CN, МПК В60G 13/14. Эластичный амортизатор, основанный на хранении электромагнитной и гидравлической энергии [Текст] / Гао Жуйцзин ; заявитель и патентообладатель Гао Жуйцзин – № 201220486527 ; заявл. 10.09.2012 ; опубл. 06.03.2013.

25 Connizzaro L., Virrinariotti G., Gialianza A., Porretto M., Marannano G. Design of an electromagnetic regenerative damper and energy harvesting assessment // Journal of Electromagnetics, Volume 1, 2016. – pp. 5-11.

26 Guoliang Hu, Yun Lu, Shuaishuai Sun, Weihua Li Performance analysis of a magnetorheological damper with energy harvesting ability // Hindawi Publishing corporation shock and vibration, Volume 2016, Article ID 2959763. – 10 p.

27 Mustafa Demetgul, Ismail Guney Design of the hybrid regenerative shock absorber and energy harvesting from linear movement // Journal of Clean Energy Technologies, Vol. 5, № 1, January 2017, – pp. 81-84.

28 M. Suresh, Walter Karg R., R. Rohith Renish, Viraal Nemani Design and analysis of dynamic electromagnetic suspension system for improved vehicle stability // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, vol. 11, № 2, January 2016. – 1252-1256 pp.

29 Kimihiko Nakano Combined type self-powered active vibration control of truck cabins // Vehicle System Dynamics 41.6 (2004). – 449-473 pp.

30 Chao Chen, Wei-Hsin Liao A self-powered, self-sensing magnetorheological damper // In : Mechatronics and Automation (ICMA), 2010 International Conference on IEEE. 2010. – 1364-1369 pp.