

УДК 629.33.027.3

UDC 629.33.027.3

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ В ПОДВЕСКЕ АВТОМОБИЛЯ**ESTIMATION OF EFFICIENCY OF APPLICATION OF SYSTEM RECOVERY OF ENERGY IN CAR SUSPENDER**

Посметьев Валерий Иванович
д.т.н., профессор

Posmetyev Valeri Ivanovich
Dr.Sci.Tech., professor

Драпалюк Михаил Валентинович
д.т.н., профессор

Drapalyuk Mikhail Valentinovich
Dr.Sci.Tech., professor

Зеликов Владимир Анатольевич
к.т.н., доцент
Воронежская государственная лесотехническая академия, Воронеж, Россия

Zelikov Vladimir Anatolyevich
Cand.Tech.Sci., associate professor
Voronezh State Academy of Forestry and Technologies, Voronezh, Russia

Представлены результаты исследований систем рекуперации в подвесках автомобилей. Разработаны и апробированы в условиях эксплуатации конструкции устройств рекуперации энергии для использования в подвесках автомобилей, которые указывают на их перспективное использование в направлении повышения эффективности автомобилей

Results of probes of systems recovery in suspenders of cars are presented. Designs of devices recovery energy for use in suspenders of cars which specify in their perspective use in a direction of increase of efficiency of cars are developed and approved under operating conditions

Ключевые слова: ПОДВЕСКА АВТОМОБИЛЯ, РЕКУПЕРАЦИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ, АВТОМОБИЛЬ

Keywords: CAR SUSPENDER, RECOVERY, EXPERIMENTAL RESEARCH, CAR

Общемировая тенденция повышения цен на топливо и жесткая конкурентная борьба на рынке вынуждает разработчиков и производителей более интенсивно вести исследования и ускоренными темпами внедрять энергосберегающие силовые установки и системы в конструкциях вновь создаваемых автомобилей различного назначения. В настоящее время наиболее экономичными по энергозатратам являются электро и гибридные автомобили, которые, несмотря на их более высокую стоимость и все еще недостаточное совершенство конструкции, вытесняют традиционные. Большинство ведущих зарубежных автопроизводителей уже освоили вполне конкурентоспособные конструкции гибридных легковых и грузовых автомобилей, а также автобусов, общее количество которых произведено за последние 10 лет свыше 15 млн. Отечественными производителями также налажен серийный выпуск двух моделей автобусов с гибридными силовыми установками. Один из них – ЛИАЗ-5292, был создан на шасси автобуса ЛИАЗ, а другой –

экобус Тролза-5250 с микротурбиной на газовом топливе (природный газ, пропан, бутан), на базе троллейбуса Тролза-5265 [1].

Дальнейшее увеличение объемов производства электро и гибридных автомобилей пока сдерживается дефицитом эффективных, компактных, безопасных и энергоемких аккумуляторов (литий-ионные, литий-нанофосфатные, никель-металл-гидритных и др.). В конструкциях гибридных автомобилей относительно легко реализовать системы рекуперации электрической энергии с помощью обратимых электромашин и электрических аккумуляторов. При этом основным, уже реализованным направлением рекуперации энергии, являются апробированные на практике различные системы генерирования, аккумуляирования и реализации электрической энергии, получаемой при торможении машины [2].

Результаты многочисленных исследований свидетельствуют о перспективности направления повышения экономичности автомобилей путем создания в их подвесках эффективных систем рекуперации. На неизбежные колебания подрессоренной массы движущегося автомобиля естественно затрачивается часть энергии силовой установки, составляющая по разным оценкам, в зависимости от дорожных условий, не менее 10-20 % общих механических потерь. Эту энергию, без вреда для снижения эффективности функционирования подвески, можно полезно использовать. Основные случаи возникновения возмущающей силы и соответственно деформаций в упругих элементах подвески автомобиля, при его движении в различных дорожных условиях, представлены на рисунке 1.

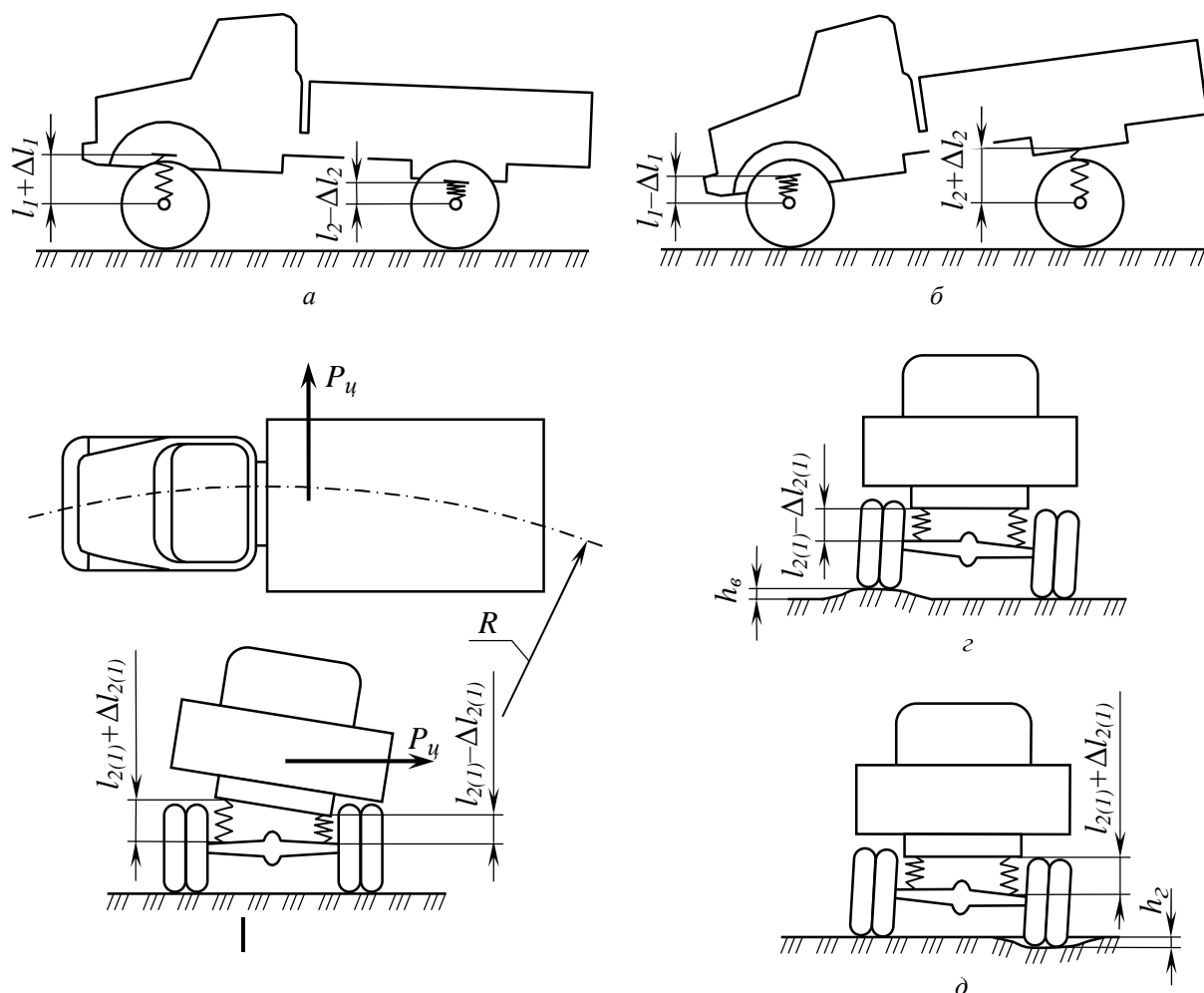


Рис. 1. Основные случаи возникновения возмущающей силы и деформации Δl_i в упругих элементах подвески автомобиля при его движении: а – с ускорением при разгоне; б – с замедлением при торможении; в – на повороте радиусом R и маневрировании при обгоне под воздействием центробежной силы $P_{ц}$; г – по дефектам дорожного полотна в виде произвольно ориентированных одиночных или чередующихся вспучиваний и гребнистости высотой h_b ; д – по просадкам и выбоинам глубиной h_p .

Здесь возвратно-поступательное движение подрессоренной массы автомобиля характеризуется такими основными параметрами в упругом элементе подвески, как перемещением, ускорением, усилием, частотой колебаний. В общем случае на величину деформации Δl_i и частоту срабатываний упругих элементов подвески автомобиля влияют: устройство конструкции подвески, масса перевозимого груза, скоростной режим движения, радиус R при поворотах и маневрировании, высота h неровностей дорожного полотна, квалификация водителя. Очевидно, что при продольных

колебаниях подрессоренной массы автомобиля (рис. 1, *a* и *б*), величина деформации в упругих элементах подвески принимает знакопеременное значение $\pm\Delta l_1$ на переднем мосту и $\pm\Delta l_2$ – на заднем. Аналогично – при поперечных колебаниях (рис. 1, *в* и *г*), причем оба вида колебаний могут происходить одновременно, как отдельно, так и совместно, и в различных сочетаниях.



Рис. 2. Классификация устройств рекуперации энергии подвески автомобиля по виду рекуперированной энергии и типу конструкции

Отечественными и зарубежными изобретателями и разработчиками новой техники к настоящему времени предложено большое число разных по типу и конструкции устройств рекуперации энергии в подвесках автомобилей (свыше 100 патентов). В общем случае они подразделяются на следующие три группы (рис. 2): электрические, гидро и пневматические, инерционно-механические. 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 других 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. Из перечисленных, наиболее перспективны электрические устройства рекуперации энергии на основе линейных генераторов, классификация и общая характеристика которых достаточно полно представлены в работе [3]. 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 автомобилей [4, 5].

С целью создания перспективной конструкции электрического амортизатора-рекуператора с высокими эксплуатационными свойствами автомобиля на первом этапе исследования были разработаны и апробированы конструкции нескольких устройств рекуперации энергии, перспективных для использования в подвеске электро и гибридного автомобиля. Эти устройства относятся к типу линейных электромагнитных генераторов (ЛЭМГ), простейший по конструкции из которых, в качестве примера, представлен на рисунке 3. В зависимости от типа и конструктивных особенностей подвесок, для повышения суммарной электрической мощности, в узле подвески могут устанавливаться от одного до нескольких таких устройств. Устройство работает самостоятельно, вне зависимости от наличия в подвеске традиционного гидравлического амортизатора и практически не влияет на работу последнего. Принцип действия ЛЭМГ основан на известном эффекте возникновения электрического тока в обмотке катушки 14 при возвратно-поступательном движении якоря из постоянного магнита 13 [6]. С целью повышения эффективности генератора в зазор между катушкой 14 и постоянным магнитом 13 введена магнитная жидкость, которая надежно удерживается в зазоре при работе устройства самим магнитом. Основными расчетными параметрами генератора, определяющими его рабочую характеристику, являются длина L_k катушки и L_m якоря, а так-

же наружный D_k и внутренний d_k диаметры катушки.

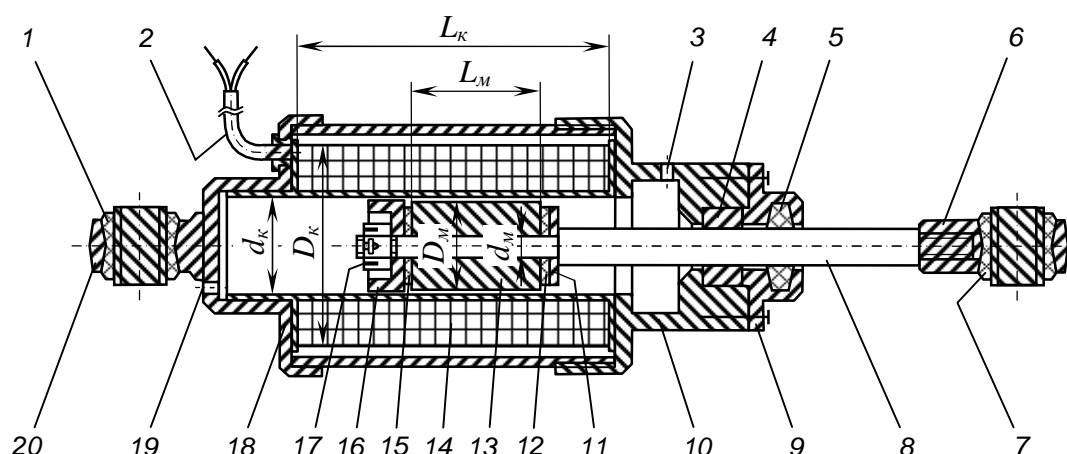


Рис. 3. Схема конструкции линейного электромагнитного генератора для подвески автомобиля: 1 и 7 – амортизационные втулки; 2 – вывод кабеля катушки генератора; 3 и 19 – отверстия декомпрессионные; 4 и 16 – втулки из антифрикционного материала; 5 – сальник; 6 и 20 – нижнее и верхнее крепежные кольца; 8 – шток; 9 и 10 – крышки сальника и корпуса генератора; 11 – шайба опорная; 12 и 15 – эластичные шайбы; 13 – постоянный магнит; 14 – катушка генератора; 17 – гайка корончатая; 18 – корпус генератора

При работе ЛЭМГ в их катушках вырабатывается переменный ток, фрагмент циклограммы действительных значений которого, представлен на рисунке 4. Параметры переменного тока i -го цикла срабатывания генератора, при движении постоянного магнита на выдвижение t_{i1} и выдвигание t_{i2} из катушки за суммарный период T_i , характеризуются соответствующими действительными положительным и отрицательным $\pm I_{oi}$ значениями. Промежутки времени t_i являются паузами между периодами T_i срабатывания генератора и их величина зависит от частоты деформаций упругих элементов подвески от воздействия на колесо неровностей и дефектов дорожного полотна.

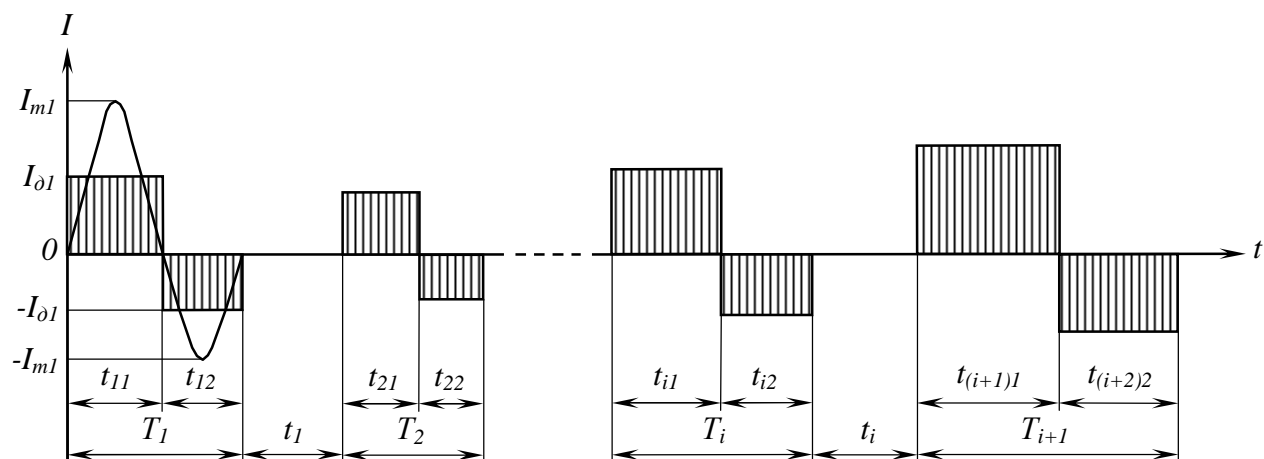


Рис. 4. Фрагмент циклограммы по времени t действительных значений I_{δ} индуцируемого переменного тока в катушке линейного электромагнитного генератора при функционировании подвески автомобиля

Величины положительных и отрицательных значений $I_{\delta i}$, а также временных параметров t_i и T_i могут значительно отличаться по величине и существенно зависят, как от скорости перемещения, так и от величины хода штока генератора.

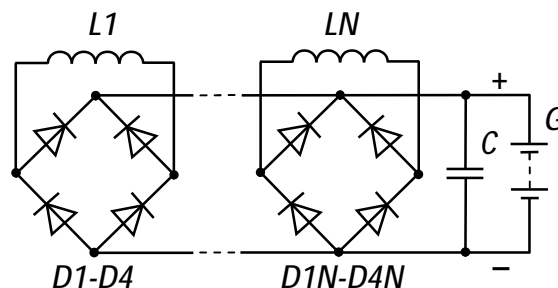


Рис. 5. Электрическая схема выпрямления переменного тока, получаемого в катушках линейных электромагнитных генераторов и подзарядки аккумулятора

Так как при работе ЛЭМГ их катушки LN вырабатывают переменный ток, то его выпрямление осуществлялось с помощью мостовых диодов $D1N-D4N$, а для «сглаживания» тока параллельно аккумулятору G подключался конденсатор C . Упрощенная схема выпрямителя переменного тока, вырабатываемого генераторами, представлена на рисунке 5, являющегося одной из составных частей преобразователя.

С целью экспериментальной проверки работоспособности и оценки эффективности системы рекуперации энергии на основе ЛЭМГ, вначале была спроектирована и изготовлена простейшая из конструкций – ЛЭМГ-1 (см. рис. 3). Ее основные конструктивные параметры составили: длина L_k катушки – 160 мм; длина L_m постоянного магнита – 50 мм, выполненного на основе материала NdFeB марки 38SH, имеющего остаточную магнитную индукцию 1,26 Тл и коэрцитивную силу 950 кА/м; диаметры катушки: внешний D_k – 100 мм, внутренний d_k – 63 мм; диаметры постоянного магнита: внешний D_m – 60 мм, внутренний d_m – 18 мм. В зазор между катушкой и магнитом помещалась магнитная жидкость марки МК8-40 объемом 10 см^3 с характеристиками: жидконоситель – трансформаторное масло, диапазон рабочих температур – от -70 до $+70$ °С, вязкость пластическая – 0,03-0,80 Па, намагниченность насыщения – 20-75 кА/м. Масса одного комплекта устройства ЛЭМГ-1 с кронштейнами крепления в подвеске автомобиля и соединительными проводами составляет 4,2 кг. Экспериментальные образцы ЛЭМГ-1 в количестве шести идентичных по конструкции устройств устанавливались с помощью съемных кронштейнов: два в подвесках переднего и четыре (попарно) – заднего мостов автомобиля УАЗ-3962. Генерируемый электрический ток от ЛЭМГ-1 с помощью блока выпрямления (см. рис. 5), а также бортовой регистрирующей и управляющей аппаратуры (РУА) направлялся в накопитель электрической энергии, в качестве которого использовался аккумулятор марки Extra Start 55 Ач, установленный в кузове автомобиля и электрически не связанный с электрооборудованием автомобиля. Масса всего возимого экспериментального оборудования, включающего шесть комплектов ЛЭМГ-1, нагрузочное устройство (нагреватель), аппаратуру преобразования, управления и контроля составила 41 кг (без аккумуляторной батареи).

С целью полноценной имитации нагрузки к смонтированной вышеописанной автономной системе рекуперации энергии с применением

ЛЭМГ-1, в качестве потребителя электрической энергии, подключался широко применяемый воздушно-керамический обогреватель салона автомобиля «AUTOLUX НВА-09R». Его номинальная электрическая мощность 200 Вт при потребляемом токе 17 А и напряжении питания 12 В. Для обеспечения надежной и стабильной работы обогревателя с установленными электрическими параметрами в блоке РУА предусмотрен стабилизатор напряжения, который автоматически отключает и включает обогреватель, не допуская снижения емкости аккумулятора ниже допустимого значения. Так как, в зависимости от возможностей аккумулятора, обогреватель работает в режиме периодического включения и выключения, фактическая вырабатываемая ЛЭМГ-1 и потребляемая обогревателем суммарная мощность фиксировалась цифровым регистратором, входящего в электронные модули РУА.

При экспериментах, с помощью системы датчиков, подключенных к РУА и бортовой ЭВМ, в режиме реального времени регистрировались: суммарные время и мощность рекуперированной энергии от ЛЭМГ-1, продолжительность, пройденное расстояние и скорость движения автомобиля. Эксперименты проводились с 4 по 15 апреля 2010 г. в г. Воронеже и Воронежской области, при различных средних значениях скорости движения 25, 50, 75 км/ч на дорогах с твердым покрытием в городе и за городом, 25, 50 км/ч – на грунтовых дорогах; загрузки автомобиля 0, 50 и 100 % (или 0, 350 и 700 кг). Для проведения опытов выбирались участки автомобильных дорог протяженностью по 100 км трех следующих категорий [7] и состояний: скоростная дорога категории ІБ с покрытием хорошего качества (в среднем 2-5 дефектов на 1 км пути по данным тензометрирования); дорога обычного типа категории V с покрытием удовлетворительного качества (в среднем 10-15 дефектов на 1 км пути); грунтовые – типичные проселочные дороги с неровностями, допускающими проезд автомобиля колесной формулы 4 Ч 4 и дорожным просветом до 220 мм со средней скоростью раз-

дельно 25 и 50 км/ч. При этом под дефектом понималось событие, зафиксированное тензометрическим датчиком, установленным в каждой из четырех подвесок автомобиля, в виде величины деформации штока ЛЭМГ-1 на величину, соответствующую высоте неровности на полотне дороги, равной ± 30 мм или от крена автомобиля при маневрировании. Эксперименты на грунтовой дороге и по бездорожью выполнялись вследствие широкого применения автомобиля повышенной проходимости УАЗ-3962 в полевых условиях (сельское и лесной хозяйство, охрана границы, геолого-разведка, строительство объектов в труднодоступных и необустроенных местах и т.п.) Опыты выполнялись в условиях, идентичных для каждой серии экспериментов с трехкратной повторностью и суммарной погрешностью измерений не более 6 %. Из записанных на жесткий диск ЭВМ данных исключались результаты, полученные при условиях проведения экспериментов, отличных от принятых.

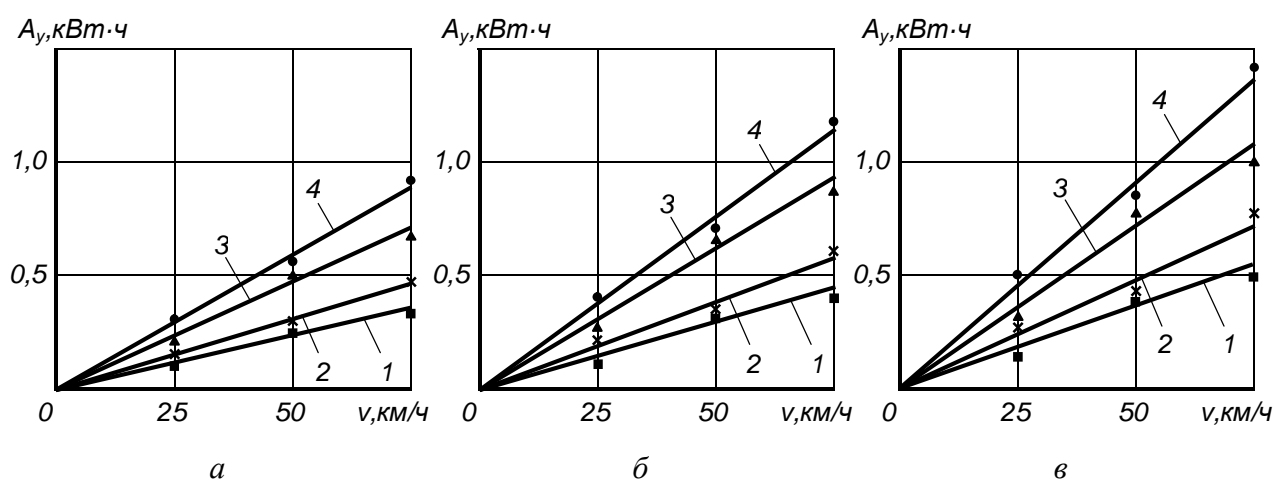


Рис. 6. Зависимости производимой устройством ЛЭМГ-1 работы A_y от скорости v движения и загрузки G_r автомобиля: а – при $G_r = 0$, б – при $G_r = 350$, в – при $G_r = 700$ кг кривые: 1 и 3 – вне города по дорогам категорий IB и V соответственно; 2 и 4 – тоже, в городе

Для удобства оценки эффективности применения системы рекуперации энергии на основе ЛЭМГ-1 принимался обобщенный показатель A_y – суммарное значение работы (в $\text{kW}\cdot\text{h}$) за время движения автомобиля на каждом из опытных участков протяженностью 100 км, которая фиксирова-

лась аппаратурой в режиме реального времени. При этом время, не связанное с движением автомобиля при вынужденных остановках (светофоры, пробки, буксование автомобиля на проселочных дорогах и т.п.), не учитывалось.

Для удобства оценки эффективности применения системы рекуперации энергии на основе ЛЭМГ-1 принимался обобщенный показатель A_y – суммарное значение работы (в кВт·ч) за время движения автомобиля на каждом из опытных участков протяженностью 100 км, которая фиксировалась аппаратурой в режиме реального времени. При этом время, не связанное с движением автомобиля при вынужденных остановках (светофоры, пробки, буксование автомобиля на проселочных дорогах и т.п.), не учитывалось.

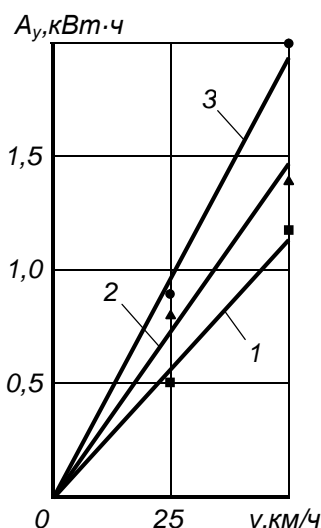


Рис. 7. Зависимости производимой работы A_y устройством ЛЭМГ-1 от скорости v движения по грунтовой проселочной дороге и загрузки G_r автомобиля: кривые: 1 – при $G_r = 0$; 2 – при $G_r = 350$; 3 – при $G_r = 700$ кг

Результаты экспериментов в условиях реальной эксплуатации при движении автомобиля без груза и с грузами массами 350 и 700 кг, по дорогам различного качества, вне и в городе, оформлены в виде соответствующих кривых графиков на рисунке 6. Из представленных данных следует, что увеличение массы перевозимого груза и скорости движения автомобиля по дорогам обеих категорий, ведет к прямо-пропорциональному увели-

чению производства устройством ЛЭМГ-1 электрической энергии A_y . Так, при прочих равных условиях, увеличение вдвое массы G_z груза повышает A_y в среднем на 20 %, а увеличение вдвое скорости v движения дает больший прирост энергии – в среднем на 47 %. Так же выявлено влияние на величину A_y качества покрытия дороги и условий движения автомобиля. В частности, по сравнению с дорогой более высокого качества категории ИБ, на дороге V категории с худшим качеством покрытия производилось больше энергии в среднем на 49 % при движении в городской черте и на 25 % – за городом. Здесь значительное повышение генерируемой ЛЭМГ-1 энергии при движении автомобиля в городской черте объясняется значительно большими возмущающими воздействиями на его подвеску, вследствие вынужденных частых остановок, притормаживаний и маневрирования. Результаты экспериментов в условиях движения автомобиля по бездорожью позволили определить зависимости получаемой энергии A_y от изменения скорости v и массы G_z перевозимого груза (рис. 7). В отличие от предыдущих экспериментов увеличение вдвое массы груза повышало A_y на заметно большую величину, которая составила в среднем 47 %. При увеличении вдвое скорости движения автомобиля производимая устройствами ЛЭМГ-1 энергия увеличивалась на примерно ту же величину – в среднем на 49 %. Еще более они эффективны при наибольшей загрузке автомобиля (700 кг) и v равной 50 км/ч. В этом случае значения A_y при движении по грунтовой дороге на 58 и 61 % больше, чем при движении по дорогам категории ИБ, соответственно вне и в черте города. То же самое для дорог V категории дает еще больший прирост энергии A_y – соответственно 74 и 82 %.

Таким образом, результаты экспериментальной проверки системы рекуперации энергии в подвеске автомобиля на основе использования устройства ЛЭМГ-1 в эксплуатационных условиях позволили сделать следующие выводы:

– независимо от категории дороги и качества ее дорожного полотна, с увеличением массы перевозимого груза и скорости движения автомобиля производство электрической энергии устройством существенно повышается, а суммарная ее величина варьируется в широких пределах от 0,3 до 1,9 кВт·ч;

– при прочих равных условиях, увеличение вдвое массы груза повышает производство устройством электрической энергии в среднем на 20 %, а увеличение вдвое скорости движения автомобиля дает значительно больший прирост энергии – в среднем на 47 %;

– по сравнению с дорогой более высокого качества категории ІБ, на дороге V категории производилось больше энергии в среднем на 49 % при движении в городской черте и на 25 % – за городом;

– суммарный объем производимой электрической энергии устройством при движении автомобиля в городской черте вдвое выше, по сравнению с его движением за городом;

– вследствие значительно больших возмущающих внешних воздействий, эффективность системы рекуперации энергии в подвеске при движении автомобиля по грунтовой дороге примерно в 1,5-2,0 раза выше по сравнению с его движением по дорогам ІБ и V категорий;

– применение системы рекуперации энергии в подвеске увеличивает массу автомобиля незначительно (на 1,6 %), однако даже при минимальной величине генерируемой ею энергии 0,3-0,5 кВт·ч, она обеспечивает надежную работу небольших по мощности потребителей в системе электроснабжения автомобиля (обогревателей, маломощных кондиционеров, вентиляторов, аудиоаппаратуры и т.п.);

– результаты выполненного исследования указывают на их перспективность и целесообразность продолжения в направлении повышения эффективности вновь создаваемых систем рекуперации в подвесках автомобилей.

Накопленный авторами опыт при создании и работе с устройством

ЛЭМГ-1, а также использование опыта других исследователей, позволили разработать и экспериментально апробировать более совершенные конструкции устройств ЛЭМГ-2 и ЛЭМГ-3. Последние обеспечили повышение генерации энергии на 30-40 % по сравнению с устройством ЛЭМГ-1. Полученные положительные результаты позволяют перейти к следующему этапу исследования, предусматривающему обоснование основных конструктивных и рабочих параметров перспективного автомобильного электрического амортизатора с высокими эксплуатационными свойствами. Являясь полноценным заменителем традиционных гидравлических амортизаторов, такое устройство одновременно выполняет и функции рекуператора энергии в электро и гибридных автомобилях. К настоящему времени, несмотря на значительное число предложений и вполне удачных апробированных конструкций, эффект от использования электрических амортизаторов все еще недостаточен для их массового внедрения. В этой связи продолжение исследования в указанном направлении представляется важным и своевременным.

Кроме автомобилей разнородная энергия начинает широко внедряться также на колесных и гусеничных тракторах, для которых проблема эффективного использования мощности традиционной силовой установки с ДВС является еще более актуальной [8]. Это объясняется существенно большими массой и динамикой движения тракторных агрегатов по пересеченной местности, как на рабочих объектах, так и при переездах с объекта на объект. Оснащение таких транспортных машин гибридными силовыми агрегатами в сочетании с совершенными системами рекуперации энергии, используемыми как на самих тракторах, так и на навешиваемом технологическом оборудовании, позволит существенно повысить их эффективность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%93%D0%B8%D0%B1> ... [Электронный ресурс] / Гибридный автомобиль.
2. Посметьев, В. И. Состояние и обоснование энергосбережения машин и оборудования способом аккумуляирования / В. И. Посметьев, М. В. Жилияков, Д. В. Шмитько // Перспективные технологии, транспортные средства и оборудование при производстве, эксплуатации, сервисе и ремонте : межвуз. сб. науч. тр. Вып. 3 ; Фед. агентство по образованию, ГОУ ВПО «ВГЛТА». – Воронеж, 2008. – С. 85-91.
3. Бабилова, Н. Л. К вопросу о классификации линейных электрических генераторов / Н. Л. Бабилова, Р. Р. Саттаров, Е. А. Полихач // Вестник УГАТУ. – Уфа : УГАТУ, 2009. Т. 12, № 1 (30). – С. 144-149.
4. <http://www.tex-invest.ru/projects/eldyngeneration.php> [Электронный ресурс] / Электродинамический амортизатор-генератор электрического тока для колесных транспортных средств.
5. Хитерер, М. Я. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения / М. Я. Хитерер, Овчинников И. Е. – СПб. : КОРОНА принт, 2008. – 356 с.
6. http://www.nbuu.gov.ua/portal/natural/Entel/2009/5_2009/5_2009_6.pdf [Электронный ресурс] / Анализ преобразования энергии в трехфазном магнитоэлектрическом линейном генераторе возвратно-поступательного движения.
7. О классификации автомобильных дорог в Российской Федерации : [Постановление Правительства РФ от 28 сентября 2009 г. № 767].
8. Посметьев, В. И. О возможности использования рекуперированной энергии лесного почвообрабатывающего агрегата для интенсификации технологического процесса / В. И. Посметьев, В. А. Зеликов, А. И. Третьяков, В. В. Посметьев // Лесной журнал. 2011. – № 1. – С. 60-64.