

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ КОЛЕБАНИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Ю.Н. Васьковский*, докт.техн.наук, М.В. Пода
НТУ Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского»
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина, e-mail: yun157@gmail.com,

Методами математического моделирования исследованы характеристики системы рекуперации энергии механических колебаний транспортных средств при их движении в сложных дорожных условиях. Приведена структура такой системы, преобразующей энергию механических колебаний в следующей последовательности: механическая энергия возвратно-поступательного движения – механическая энергия вращательного движения – электрическая энергия переменного тока – электрическая энергия постоянного тока. В состав системы входят: механическое устройство преобразования возвратно-поступательных колебаний шасси транспортного средства в однонаправленное вращение ротора электрогенератора, трехфазный генератор переменного тока с постоянными магнитами, выпрямитель и аккумуляторная батарея. Исследованы режимы работы системы, обеспечивающие эффективные процессы зарядки аккумуляторной батареи. На конкретном примере системы приведены данные о времени зарядки аккумуляторных батарей грузового автомобиля.

Библ. 9, рис. 7.

Ключевые слова: система рекуперации энергии, синхронный генератор с постоянными магнитами, аккумуляторная батарея.

Постановка задачи. Расширение функциональных возможностей современных транспортных средств (ТС) требует использования на их борту новых устройств и систем, для работы которых необходимы дополнительные источники электропитания. Поскольку вся энергия, которую получает ТС для своего функционирования, поступает от приводного двигателя (обычно это двигатель внутреннего сгорания), то дополнительные источники электропитания можно получить только на основе принципов энергосбережения – путем выявления бесполезных потерь энергии в ТС и разработки систем их преобразования (рекуперации) в полезные запасы электроэнергии аккумуляторной батареи (АБ). Одной из таких является система электромеханического преобразования (рекуперации) энергии механических колебаний (СПЭМК) шасси ТС, возникающих при движении ТС. Разработка и исследование таких систем проводится рядом иностранных компаний – Bose, Levant Power Corp, Audi [5–7]. Следует подчеркнуть, что СПЭМК по своему назначению, принципу действия и характеристикам существенно отличается от разрабатываемых рядом компаний систем активной подвески шасси ТС, главным назначением которых является создание стабилизирующих усилий для уменьшения вертикальных колебаний шасси ТС с целью повышения комфортности езды, удержания дороги и др. (системы активной подвески АП). В системах АП также используется функция рекуперации энергии, однако она является дополнительной и направлена на снижение расхода электроэнергии, затрачиваемой на функционирование системы активной подвески от бортовых источников электропитания [8, 9]. При этом создаваемое системой АП стабилизирующее усилие должно быть соизмеримым с массовыми характеристиками поддрессоренной массы (ПМ) ТС. Поэтому разрабатываемые системы АП направлены, прежде всего, на применение в легковых автомобилях. В отличие от систем АП система СПЭМК в большей степени ориентирована на использование в тяжелых ТС.

Принцип действия СПЭМК основан на использовании колебательных перемещений ПМ (кузов, груз и др.) относительно неподдрессоренной массы (НПМ) (колеса, шины, тормозные барабаны и др.) ТС в вертикальной плоскости, которые возникают при движении ТС по неровной дороге. Такие вертикальные перемещения ПМ позволяют создать систему электромеханического преобразования энергии механических колебаний в полезную электроэнергию.

Для оценки потерь энергии, вызванных вертикальными колебаниями ПМ ТС, рассмотрим примеры нескольких тяжелых ТС специального назначения: грузовик Kraz Shrec массой 17,5 т и бро-

нетранспортер БТР-4 Буцефал массой 21,9 т. Предполагая, что соотношение НПМ и ПМ равно 1:15, что характерно для большинства ТС, величины ПМ для рассмотренных ТС равны соответственно 16,4 и 20,5 тонн. За одно перемещение таких масс на глубину $A = 0,05$ м изменение их потенциальной энергии составит $\Delta W = 8$ и 10 кДж. После затухающих колебаний указанная энергия рассеивается в амортизаторах шасси. При выходе ТС из ямки вверх потенциальная энергия ПМ увеличивается за счет энергии приводного двигателя. Если при движении ТС по пересеченной местности такие колебания повторяются, например, с частотой $f = 0,2$ Гц, то теряемая в амортизаторах ТС мощность равна соответственно $\Delta P = 1,6$ и 2 кВт. В реальных условиях повторяемость ям на дороге и их глубина носят случайный характер, однако при движении ТС в сложных дорожных условиях указанные потери мощности могут быть существенно больше. Полученная оценка свидетельствует о значительных потерях мощности двигателя ТС на преодоление механических колебаний ПМ, что делает целесообразным ее рекуперацию, накопление и дальнейшее использование в системах ТС.

Структурная блок-схема СПЭМК показана на рис. 1.

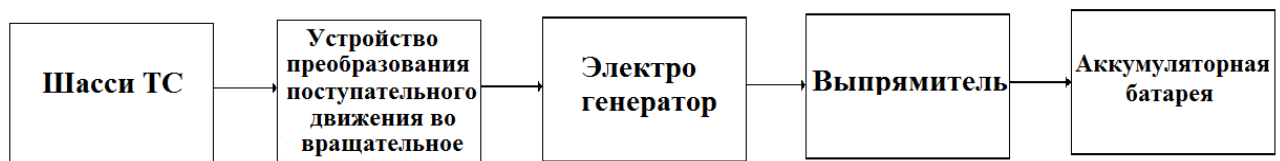


Рис. 1

Работа СПЭМК происходит следующим образом. Взаимные возвратно-поступательные перемещения ПМ и НПМ через механическое преобразовательное устройство превращаются в *однаправленное* вращательное движение ротора электрогенератора. При движении ПМ вниз такое устройство механически соединяет вал генератора с ПМ, чем обеспечивается передача ее кинетической энергии на вал генератора. При движении ПМ вверх устройство механически отсоединяет генератор от ПМ, а ротор совершает затухающее вращение до следующего движения ПМ вниз. При этом обратной передачи энергии от генератора к ПМ не происходит. С учетом относительно невысоких линейных скоростей вертикальных колебаний ПМ для получения требуемой частоты вращения ротора генератора в состав устройства может включаться редуктор с коэффициентом редукции k_r . Генератор осуществляет электромеханическое преобразование энергии, переменное напряжение на выходе генератора преобразуется выпрямителем в постоянное и заряжает аккумуляторную батарею (АБ). Таким образом, в СПЭМК происходит однонаправленная передача энергии от ПМ к генератору и преобразование ее параметров в следующей последовательности: механическая энергия колебательного возвратно-поступательного движения ПМ – механическая энергия вращательного движения ротора генератора – электрическая энергия переменного тока генератора – накопленная электрическая энергия АБ.

Целью статьи является оценка методами математического моделирования эффективности функционирования СПЭМК для определения целесообразности и оптимальных условий их практического применения в транспортных средствах.

Математическая модель. Рассмотрим физические процессы в СПЭМК, возникающие в результате наезда ТС на *уединенную* ямку глубиной A . Шасси ТС содержат упругие рессоры и амортизаторы колебаний ПМ. Возникающие при этом затухающие *собственные колебания* ПМ в вертикальной плоскости описываются следующим уравнением [4]:

$$\frac{d^2z}{dt^2} + 2h \frac{dz}{dt} + \omega^2 z = 0, \quad (1)$$

где z – вертикальное перемещение ПМ, (м); $\omega = \sqrt{C_p / M_{ПМ}}$ – частота собственных колебаний ПМ, (1/с); C_p – жесткость рессоры (пружины), (кг/с²); $M_{ПМ}$ – масса ПМ, (кг); $h = \mu_a / 2 M_{ПМ}$ – коэффициент затухания колебаний, (1/с); μ_a – коэффициент сопротивления амортизатора, (кг/с). Уравнение (1) получено на основе баланса действующих на ПМ сил: силы инерции (пропорциональна ускорению dz^2/dt^2), силы сопротивления амортизатора (пропорциональна скорости $v = dz/dt$) и силы деформации рессоры (пропорциональна перемещению z). В уравнении (1) не учитывается упругое влияние неподдрессоренных масс ТС, что в большинстве случаев не вносит существенных погрешностей [4].

Решение уравнения (1) имеет следующий вид:

$$z(t) = Ae^{-ht} \sin(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

где A , (м) – величина начального смещения ПМ по отношению к НПМ (колесам) ТС, равная глубине ямки; $\varphi = \arctg(\omega / h)$ – начальная фаза колебания, определяемая из начального условия $v(0) = 0$.

С учетом величины ПМ коэффициент жесткости рессоры C_p и коэффициент сопротивления амортизатора μ_a обычно выбираются такими, чтобы частота собственных колебаний ПМ лежала в пределах 1,2...1,8 Гц и за 3 ... 4 колебания их амплитуда уменьшалась в 10 и более раз. Электрогенератор, входящий в СПЭМК, также оказывает амортизирующее действие на ПМ. И поэтому в коэффициент μ_a нужно было бы ввести дополнительное слагаемое, учитывающее демпфирующее влияние генератора. Однако, как показывает проведенный анализ, в ТС с большой ПМ суммарное демпфирующее действие рессоры и амортизатора многократно превосходит тормозящее усилие генератора. Например, рассмотренный далее генератор может создать максимальное демпфирующее усилие на ПМ не более 38 кг, что намного меньше, чем сила тяжести ПМ тяжелых ТС. Поэтому в качестве допущения далее будем *тормозящим действием генератора пренебрегать*.

Из (2) легко получить выражение для скорости колебаний ПМ

$$v(t) = \frac{dz}{dt} = Ae^{-ht} [\omega \cos(\omega t + \varphi) - h \sin(\omega t + \varphi)]. \quad (3)$$

На рис. 2, как пример, показаны графики перемещения (сплошная линия) и скорости (пунктирная линия) затухающих колебаний ПМ массой 16 тонн при попадании ТС в ямку высотой 5 см.

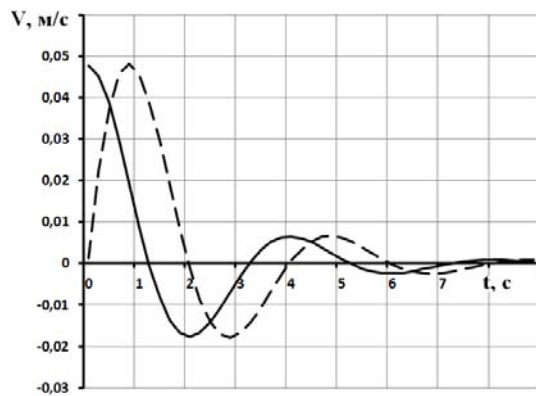


Рис. 2

Линейная скорость вертикального движения ПМ преобразуется в угловую частоту вращательного движения ротора генератора в соответствии с выражением $\omega = v / R$, где R – радиус круга от точки приложения силы линейного перемещения ПМ до центра вращения устройства, преобразующего поступательное движение ПМ во вращательное движение ротора генератора. При этом ускорение ротора происходит до тех пор, пока скорость ПМ увеличивается (на рис. 1 – до 1с). При уменьшении скорости ПМ вследствие упругого действия рессор и при обратном ее движении генератор отсоединяется от ПМ и совершает замедленное вращение под действием собственного электромагнитного момента M_{EM} .

Если до следующего колебания ПМ скорость её поступательного движения вниз затухнет сильнее, чем частота вращения ротора генератора, то соединение ротора с ПМ не произойдет, и он будет продолжать замедленное вращение. Таким образом, для показанного на рис. 2 примера передача энергии от ПМ к генератору будет происходить только до первой амплитуды скорости (в течении 1 с). На основании указанного принципа действия СПЭМК с учетом формулы (3) выражение для угловой частоты вращения ротора генератора примет следующий вид:

$$\omega(t) = \left\{ \begin{array}{l} Ae^{-ht} [\omega \cos(\omega t + \varphi) - h \sin(\omega t + \varphi)] / R, \text{ если } d\omega/dt > 0 \text{ и } \omega > 0 \\ \omega_{max} - (\int M_{EM} dt) / J, \text{ если } d\omega/dt < 0 \text{ и } \omega < 0 \end{array} \right\}, \quad (4)$$

где ω_{max} – максимальная угловая частота вращения, приобретенная ротором во время предыдущего колебания; J – суммарный момент инерции вращения ротора генератора, редуктора и устройства преобразования поступательного движения. Вторая строка в (4) характеризует затухание частоты вращения под действием электромагнитного момента. Расчет M_{EM} проводится в электрической подсистеме СПЭМК с учетом мгновенных значений частоты вращения ротора и тока статора.

При движении ТС в сложных дорожных условиях с часто встречающимися неровностями дороги на ПМ действует последовательность импульсов возмущающих сил, при которых возникают *вынужденные колебания* ПМ. Неровности дороги характеризуются случайной формой, размерами и периодом чередования, причем каждая неровность может передавать на ТС не один, а несколько импульсов сил, воздействующих последовательно на каждую ось шасси ТС и даже отдельное колесо. Характер колебаний зависит и от скорости движения ТС, что существенно усложняет анализ. Поэтому далее рассматривается электромеханическое преобразование энергии колебаний при движении ТС

по дороге с достаточно удаленными друг от друга ямками, при котором свободные колебания ПМ, вызванные преодолением одной ямки, успевают затухнуть. Учитывая реальное время затухания свободных колебаний и скорости движения тяжелых ТС, такой подход представляется обоснованным.

Ключевым элементом СПЭМК является электрогенератор. Наиболее оптимальным типом электрогенератора в составе СПЭМК является трехфазный синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов (СГПМ). Поскольку механический момент, приводящий СГПМ во вращение, имеет случайный импульсный характер, генератор не имеет установившегося режима работы – он всегда работает в переходных режимах с переменной частотой вращения вала. Поэтому использование постоянных магнитов как источника магнитного потока является оптимальным техническим решением с учетом особенностей функционирования СПЭМК, а также ряда других преимуществ генераторов такого типа (отсутствие электрических потерь в роторе, отсутствие подвижного электрического контакта между статором и ротором и др.).

Входной величиной для генератора является функция частоты вращения ротора по выражению (4), а выходными величинами – уровень энергии заряда АБ – E_{AB} , выраженный в процентах по отношению к максимально допустимому уровню, значения тока и напряжения АБ и время ее зарядки. Величина M_{EM} через обратную связь подается на вход генератора для формирования функции $\omega(t)$. Параметры генератора – магнитный поток постоянных магнитов Φ_M , число пар полюсов p , активное сопротивление r_{CT} и индуктивность L_{CT} обмотки статора – задаются в блоке СГПМ в системе Matlab – Simulink. АБ характеризуется номинальным напряжением U_{ABH} . Выражения для математических моделей СГПМ, выпрямителя и АБ хорошо известны, поэтому здесь не приводятся.

Модель системы СПЭМК реализована в системе Matlab – Simulink и показана на рис. 3.

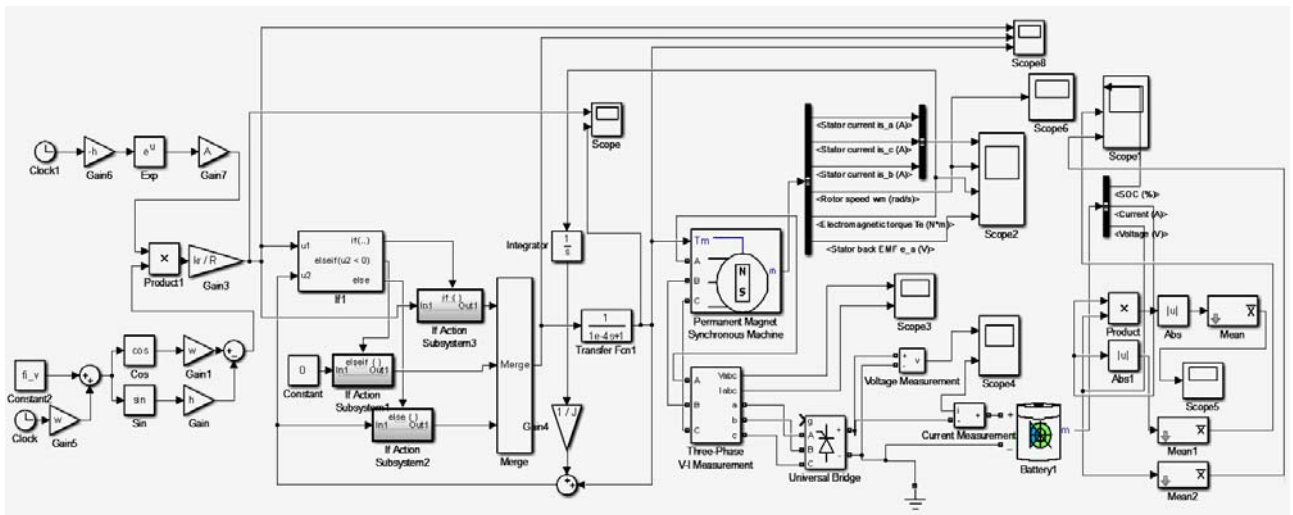


Рис. 3

Режимы работы и эффективность СПЭМК определяются численными значениями параметров следующих узлов: 1) шасси ТС – $M_{ПМ}$, C_p , μ_a ; 2) механического устройства преобразования – k_r , R , J ; 3) СГПМ – Φ_M , p , r_{CT} , L_{CT} ; 4) АБ – E_{AB} , U_{ABH} . Поиск оптимального сочетания указанной совокупности параметров представляет сложную задачу, которая может выполняться только путем математического моделирования с учётом конкретной направленности и ожидаемых характеристик СПЭМК.

Результаты моделирования. В качестве конкретного примера рассмотрена СПЭМК для тяжёлого грузовика типа Kraz Shres с массой ПМ $M_{ПМ} = 16,4$ тонн. Параметры шасси характеризуются совокупностью коэффициентов $h = 0,5$ 1/с, $\omega = 1,58$ Гц, $C_p = 4 \cdot 10^4$ кг/с², $\mu_a = 16 \cdot 10^4$ кг/с. Входящий в состав СПЭМК СГПМ имеет ряд существенных отличий по сравнению с синхронными машинами традиционного исполнения. Эти отличия обусловлены конструктивными возможностями размещения генератора на шасси ТС, а также импульсными режимами его работы. Рассматриваемый СГПМ спроектирован с применением полевых методов расчета [1, 2], а выбор его оптимальных параметров рассмотрен в работе [3]. На рис. 4 показан эскиз поперечного сечения активной зоны СГПМ. Генератор имеет следующие данные: расчетная (номинальная) мощность 400 Вт; расчетная (номинальная) частота вращения ротора 200 об/мин; максимальная частота вращения 1500 об/мин; линейное напряжение при максимальной частоте вращения (действующее значение) 210 В; число пар полюсов 5; внеш-

ний диаметр ярма статора 0,1 м; внутренний диаметр ярма ротора 0,022 м; длина сердечника статора 0,26 м. Постоянные магниты на роторе имеют радиально направленный вектор намагниченности, а параметры магнитов выбираются исходя из необходимости получения в воздушном зазоре требуемой величины магнитного потока возбуждения. Поскольку электрической нагрузкой СГПМ является выпрямитель и далее АБ, то требование синусоидальности ЭДС обмотки статора отсутствует, а критерием выбора параметров СГПМ в составе СПЭМК является наибольшее действующее значение ЭДС обмотки статора. Суммарный момент инерции вращения ротора СГПМ, системы рычагов и передаточных шестерён механического устройства преобразования в расчетах варьировался. Коэффициент редукции принят в диапазоне $k_r = 6 \dots 8$. В качестве АБ выбрана штатная АБ типа 6СТ-190, применяемая в тяжелых автомобилях КраЗ, КАМАЗ и др. Номинальное напряжение АБ равно $U_{АБН} = 12$ В, ее емкость варьировалась в заданных пределах 170 ... 190 Ач., время полного заряда при постоянном зарядном токе 19 А равно 8 ... 10 часов. Рассматриваемая СПЭМК может использоваться для подзарядки штатной АБ при движении указанных ТС.

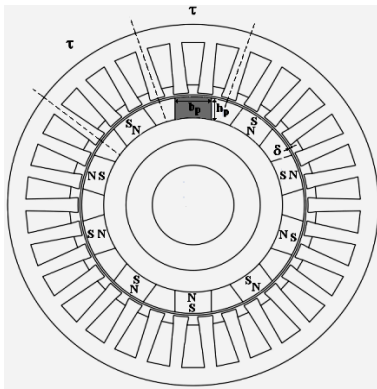


Рис. 4

На рис. 5 – 7 представлены временные графики, характеризующие процессы в СПЭМК при прохождении ТС одной ямки глубиной 0,2 м. На рис. 5 показаны угловые частоты колебательного вращения ведущей части механического устройства преобразования (кривая 1) и однонаправленного вращения ротора СГПМ (кривая 2).

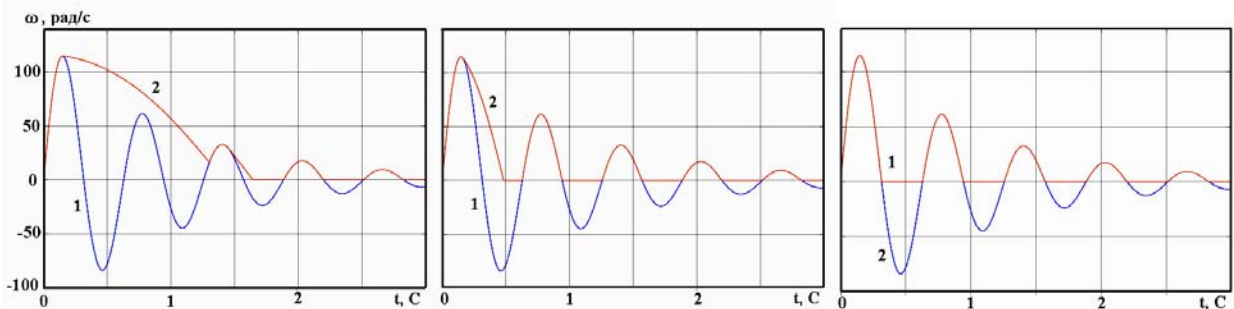


Рис. 5

Представлены три варианта с различными значениями момента инерции вращающихся масс. При заданных параметрах шасси ПМ в течении 2 с совершает 4 быстро затухающих колебаний. Пиковое значение угловой частоты вращения ротора генератора составляет 120 рад/с или 1150 об/мин, а максимальная линейная скорость ПМ равна 1,8 м/с. В первом варианте “тяжелый ротор” получает при первом колебании достаточный запас кинетической энергии, которая далее преобразуется в электрическую при торможении ротора под действием электромагнитного момента генератора. Только на третьем колебании ПМ ротор вновь получает дополнительное ускорение. В третьем варианте “легкий ротор”, момент инерции которого определяется только собственной массой ротора описанного выше СГПМ, повторяет положительно направленные движения ведущей части механического устройства преобразования, а между положительными импульсами скорости ротор полностью останавливается. На рис. 6 показаны соответствующие функции энергии и тока заряда АБ.

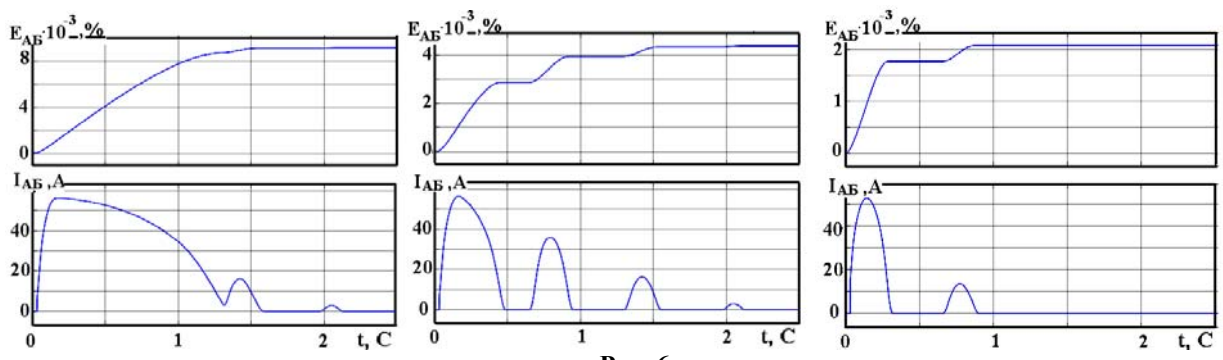


Рис. 6

На рис. 7 для первого расчетного варианта изображены временные зависимости тока, электромагнитного момента и фазного напряжения обмотки статора СПММ.

Как следует из рис. 6, энергия, переданная в АБ ёмкостью 170 Ач, при одном колебании ПМ на ямке глубиной 0,2 м и различных моментах инерции ротора составляет $(2,3 \dots 9) \cdot 10^{-3} \%$ от полной зарядной энергии АБ, которая равна $170 \cdot 3600 \cdot 12 = 7344$ кДж ($1 \text{ А} \cdot \text{ч} = 1 \text{ Вт} \cdot \text{ч} / 1 \text{ В}$). Меньшее значение относится к СПММ с “легким ротором”, не имеющим дополнительных маховиков, поддерживающих скорость его вращения. В абсолютных значениях эта энергия равна $\Delta E_{AB} = (170 \dots 680)$ Дж. При этом амплитуда первого импульса зарядного тока достигает значения 55 А.

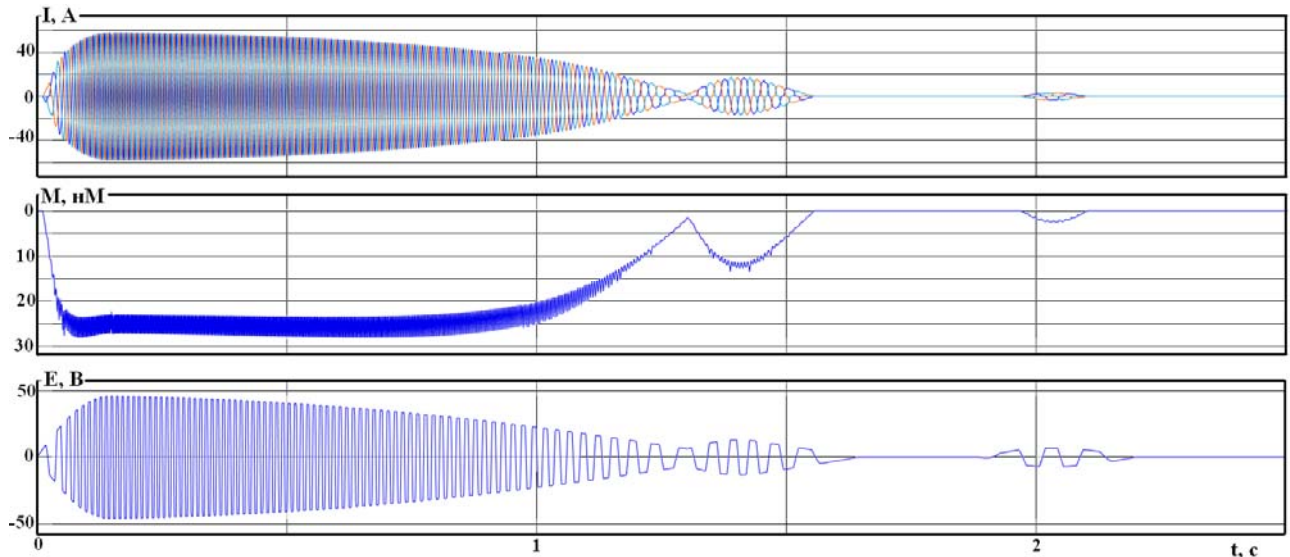


Рис. 7

КПД электромеханического преобразования в СПЭМК можно определить как отношение переданной в АБ электроэнергии к потенциальной механической энергии, теряемой ПМ при прохождении одной ямки

$$\eta = \Delta E_{AB} / M_{PM} gA. \quad (5)$$

С учетом того, что при прохождении ямки глубиной 0,2 м теряемая ТС механическая энергия равна $M_{PM} gA = 16400 \cdot 9,8 \cdot 0,2 = 32144$ Дж, имеем $\eta = (0,54 \dots 2,14)\%$. Столь малый КПД объясняется тем, что в тяжелых ТС основная энергия механических колебаний поглощается амортизаторами ТС. В уравнении (1) этот фактор отображается наличием коэффициента μ_a .

Для определения времени полной зарядки АБ необходимо с помощью представленной выше математической модели выполнить серию последовательных расчетов с учетом фактического количества и размеров пройденных ямок. Поскольку напряжение АБ стабилизируется на уровне, близком к номинальному значению уже после нескольких зарядных импульсов тока, процесс дальнейшей зарядки АБ в первом приближении можно рассматривать путем суммирования энергии последовательных колебаний ПМ.

Суммарное время заряда АБ определяется скоростью движения ТС и дорожными условиями – количеством и размерами ям. Для примера, пусть ТС движется со скоростью 40 км/час. При этом через каждые 25 м на дороге встречаются ямки одинаковой глубины 0,2 м, т.е. на 1 км дороги ТС преодолит 40 ямок, а за час езды – 1600 ямок. Рекуперированная в АБ за час езды энергия, полученная путем суммирования энергии отдельных колебаний в зависимости от массовых характеристик генератора, составит $(3,68 \dots 14,4)\%$ от полной её зарядной энергии. Соответственно время полной зарядки АБ будет равно 27 ... 7 часов. Поскольку рекомендуемый уровень разряда АБ, как правило, не должен превышать 50% номинальной величины зарядной энергии, то для подзарядки на половину разряженной АБ потребуется 14 ... 3,5 часов непрерывной езды ТС с данной скоростью и в указанных дорожных условиях. Очевидно, что при более неблагоприятных дорожных условиях и при большей скорости движения ТС время зарядки существенно уменьшается. Хотя представленная оценка

носит примерный характер, тем не менее, она свидетельствует о приемлемой эффективности рассматриваемой СПЭМК для подзарядки штатной АБ во время движения тяжелого ТС, даже в том случае, если ротор генератора не оснащён дополнительными маховиками для поддержания скорости его вращения в паузах между полезными колебаниями ПМ. СПЭМК может дополнять или дублировать функции основного автомобильного генератора ТС. Являясь дополнительным источником электропитания на борту ТС, СПЭМК может обеспечивать подзарядку АБ даже в случае поломки основного генератора.

Рассматриваемая СПЭМК может использоваться и для зарядки вспомогательных АБ меньшей ёмкости, например, 10 Ач, предназначенных для питания дополнительных бортовых потребителей ТС. Время подзарядки будет меньше. Например, при указанных выше дорожных условиях энергия, переданная в АБ ёмкостью 10 Ач за одно колебание, составит 0,12% её максимального заряда, а время зарядки наполовину разряженной АБ до полного уровня составит около 2 часов езды ТС.

Очевидно, что длительность и эффективность зарядки АБ зависит не только от дорожных условий и скорости движения ТС, но в значительной мере и от правильной “настройки” параметров многопараметрической системы СПЭМК, что возможно только с помощью математического моделирования. Результаты моделирования свидетельствуют о целесообразности разработки таких систем.

Выводы. Система электромеханической рекуперации энергии механических колебаний шасси ТС, возникающих при его движении, создает дополнительный источник электропитания, обеспечивающий подзарядку АБ и функционирование устройств и систем на борту ТС. Анализ свидетельствует о достаточных запасах бесполезно теряемой энергии механических колебаний ТС, движущихся в сложных дорожных условиях, что делает целесообразным разработку и внедрение систем рекуперации этой энергии, особенно в тяжелых ТС. Основными составляющими системы являются: механическое устройство преобразования вертикальных возвратно-поступательных движений ПМ ТС в однонаправленное вращательное движение ротора электрогенератора, электрогенератор переменного тока с постоянными магнитами на роторе, выпрямитель и аккумуляторная батарея, причем работоспособность и эффективность системы существенно зависит от правильного выбора и согласования параметров генератора и АБ с характеристиками шасси ТС.

Полученные показатели времени и энергии заряда нескольких примеров АБ свидетельствуют о перспективности разработки, экспериментальной проверки и внедрения рассматриваемых систем, особенно для тяжёлых ТС, функционирующих в сложных дорожных условиях.

1. Васьковский Ю.Н., Гайдено Ю.А., Русятинский А.Е. Математическое моделирование и выбор конструктивных параметров тягового синхронного двигателя с постоянными магнитами. *Техн. электродинамика*. 2013. № 6. С.40-45.

2. Васьковский Ю.М., Гайдено Ю.А. Дослідження електромагнітних процесів в синхронних машинах з постійними магнітами на основі коло-польових математичних моделей. *Техн. электродинамика*. № 2. 2018. С. 47 – 54. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.02.047>

3. Васьковский Ю.М., Пода М.В., Кошикар І.В. Електрогенератор в системі рекуперації енергії механічних коливань транспортних засобів. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2018. № 5. С. 24 – 28. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.5.04>

4. Вахламов В.К. Автомобили. Эксплуатационные свойства. М.: Academia, 2005. 241 с.

5. Electromagnetic suspension Bose. *Drive2 Automobile magazine* [Electronic resource]. 2016. URL: <https://www.drive2.ru/b/721443/> (accessed 19.06.2018)

6. GenShock — suspension system performing the function of energy regeneration. *Drive2 Automobile magazine* [Electronic resource]. 2016. URL: <https://www.drive2.com/b/668040/> (accessed 19.06.2018)

7. The innovative shock absorber system from Audi. Audi MediaCenter [Electronic resource]. 2017. URL: <https://www.audi-mediacycenter.com/en/press-releases/the-innovative-shock-absorber-system-from-audi-new-technology-saves-fuel-and-enhances-comfort-6551> (accessed 19.06.2018)

8. Yan Shuai, Sun Weichao. Energy Regeneration Scheme and Self-powered Criterion of Motor-driven Active Suspension. 35th *Chinese Control Conference*, July 27-29, 2016. Chengdu, China. Pp. 8926-8931.

9. Pham T.H., Jacob J., Wilkins S., Lauwerys C., Dhaens M. Integrated Model for Battery Electric Vehicles with Energy Harvesting Active Suspension System. Twelfth International Conference on *Ecological Vehicles and Renewable Energies* (EVER). 2017. European Union. 978-1-5386-1692-5/17.

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ КОЛИВАНЬ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Ю.М. Васьковський*, докт.техн.наук, М.В. Пода

НТУ України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна, e-mail: vun157@gmail.com

Методами математичного моделювання досліджено характеристики системи рекуперації енергії механічних коливань транспортних засобів за їхнього руху у складних дорожніх умовах. Наведено структуру такої системи, яка перетворює енергію механічних коливань у наступній послідовності: механічна енергія зворотно-поступального руху—механічна енергія обертального руху—електрична енергія змінного струму—електрична енергія постійного струму. До складу системи входять: механічний пристрій перетворення зворотно-поступальних коливань шасі транспортного засобу в односпрямоване обертання ротора електрогенератора, трифазний генератор змінного струму з постійними магнітами, випрямляч і акумуляторна батарея. Досліджено режими роботи системи, що забезпечують ефективні процеси зарядки акумуляторної батареї. На конкретному прикладі системи наведено дані щодо часу зарядки акумуляторних батарей вантажного автомобіля. Бібл. 9, рис. 7.

Ключові слова: система рекуперації енергії, синхронний генератор з постійними магнітами, акумуляторна батарея.

MODELING OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS FOR RECOVERY ENERGY OF VEHICLE VIBRATIONS

Yu.N. Vaskovskiy, M.V. Poda

National Technical University of Ukraine Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute,
pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine, e-mail: vun157@gmail.com

In the article, the characteristics of the energy recovery system of mechanical vibrations of vehicles during their movement in difficult road conditions are investigated using mathematical modeling methods. The structure of such system is presented, which converts the energy of mechanical vibrations in the following sequence: the mechanical energy of the reciprocating motion—the mechanical energy of the rotational motion—the electrical energy of alternating current—the electrical energy of direct current. The system includes: a mechanical device for converting reciprocating oscillations of the vehicle chassis into a unidirectional impedance of the rotor of an electric generator, a three-phase alternator with permanent magnets, a rectifier and a battery. The system operation modes that ensure efficient battery charging processes are investigated. For a specific example of a system data of the charging time of a truck's batteries are presented. References 9, figures 7.

Keywords: energy recuperation system, synchronous generator with permanent magnets, rechargeable battery.

1. Vaskovskiy Yu.N., Haydenko Yu.A., Rusyatinsky A.E. Modeling the operating modes of the traction synchronous motor with permanent magnets. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2013. No 5. Pp. 19-22. (Rus)
2. Vaskovskiy Yu.M., Haidenko Yu.A. Investigation of electromagnetic processes in synchronous machines with permanent magnets on the basis of circuit-field mathematical models. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 2. Pp. 47-54. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.02.047>
3. Vaskovskiy Yu.M., Poda M.V., Kochicar I.V. Electrogenator in the system of energy recovery of mechanical vibrations of vehicles. *Electrical engineering & electromechanics*. 2018. No 5. Pp. 24–28. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.5.04>
4. Vahlamov V.K. Cars. Performance properties. Moskva: Academia, 2005. 241 p. (Rus)
5. Electromagnetic suspension Bose. *Drive2 Automobile magazine* [Electronic resource]. 2016. URL: <https://www.drive2.ru/b/721443/> (accessed 19.06.2018)
6. GenShock – suspension system performing the function of energy regeneration. *Drive2 Automobile magazine* [Electronic resource]. 2016. URL: <https://www.drive2.com/b/668040/> (accessed 19.06.2018)
7. The innovative shock absorber system from Audi. Audi MediaCenter [Electronic resource]. 2017. URL: <https://www.audi-mediacyber.com/en/press-releases/the-innovative-shock-absorber-system-from-audi-new-technology-saves-fuel-and-enhances-comfort-6551> (accessed 19.06.2018)
8. Yan Shuai, Sun Weichao. Energy Regeneration Scheme and Self-powered Criterion of Motor-driven Active Suspension. 35th *Chinese Control Conference*, July 27-29, 2016. Chengdu, China. Pp. 8926-8931.
9. Pham T.H., Jacob J., Wilkins S., Lauwerys C., Dhaens M. Integrated Model for Battery Electric Vehicles with Energy Harvesting Active Suspension System. Twelfth International Conference on *Ecological Vehicles and Renewable Energies* (EVER). 2017. European Union. 978-1-5386-1692-5/17.

Надійшла 19.07.2018

Остаточний варіант 23.04.2019