

УДК 621.313.001.3

ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ – ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

В.Б. Баль, В.Я. Геча, В.И. Гончаров, Е.В. Ежов,
В.Г. Чиркин, С.В. Ширинский, Л.Ю. Лежнев

Содержится обзор разработок и публикаций за последние 10 лет, посвящённых применению электрических машин возвратно-поступательного действия. Рассмотрены примеры преобразователей энергии морских волн, применение линейных машин в активной подвеске автомобиля и системах стабилизации, автономные источники энергии на базе линейных генераторов с двигателем Стирлинга. Особое внимание уделяется применению генератора, встроенного в двигатель внутреннего сгорания со свободным поршнем, а также применение двигателя аналогичной конструкции для управления положением поршня в двигателе. По каждому варианту использования линейной электрической машины рассмотрены применяемые типы машин, возможные конструктивные исполнения и достигнутые результаты. Некоторое внимание уделяется теоретическим разработкам нетрадиционных конструкций. В заключении отмечается актуальность рассмотрения линейных электрических машин в последнее время.

Ключевые слова: линейная электрическая машина, линейный генератор, линейный электрический двигатель, электрическая машина возвратно-поступательного действия, применение.

Линейные электрические машины успешно применяются для преобразования электрической энергии непосредственно в механическую энергию поступательного движения и наоборот, исключая необходимость в механическом преобразователе вращательного движения традиционных электрических машин в поступательное. Исключение лишнего звена преобразования с его неизбежными потерями мощности в ряде случаев перевешивает известные недостатки линейных двигателей, такие как несимметрия магнитной цепи и краевые эффекты. Такие явления не только усложняют расчёт, но и создают дополнительные потери мощности. В электрическом двигателе поступательного движения проблемой является формирование эффективной структуры вторичного элемента, который может иметь весьма существенную протяжённость (в случае электрического транспорта). Гораздо проще реализовать оптимальную структуру в машинах возвратно-поступательного движения, в которых размеры первичного и вторичного элементов оказываются относительно небольшими. Именно такие линейные электрические машины являются объектом настоящего исследования. В силу принципиальной обратимости электрических машин здесь рассматриваются в равной степени как двигатели, так и генераторы электрической энергии.

При этом в последние 10 – 15 лет выделилось несколько направлений применения линейных электрических машин, которые активно обсуждаются в научной литературе. В статье приведён об-

зор таких направлений и вариантов применяемых линейных электрических машин.

Преобразователь энергии морских волн

Применение линейной электрической машины для преобразования энергии морских волн в электрическую энергию представляется сейчас одним из самых проработанных направлений. За последние 15 лет проводились не только отдельные поисковые исследования, но реализовывалось несколько государственных и межгосударственных программ исследований по разработке установок для преобразования энергии морских волн в электрическую энергию. В частности, такие проекты осуществлялись Румынией (на черноморском побережье) и консорциумом скандинавских стран – в бассейне Балтийского моря. Различные системы преобразования энергии используют плавающие или неподвижные бассейны с гидравлическими или воздушными турбинами и вращающимися электрическими машинами. Но разработаны и точечные абсорберы (Archimedes Wave Swing (AWS), Point Absorber Wave Energy Converter) с многополюсными линейными генераторами. Такие конструкции отличаются повышенной эффективностью и надёжностью в силу прямого преобразования линейного перемещения поплавка в электрическую энергию, без промежуточных преобразований.

В статье [1] представлено подробное описание типичной установки с поплавком и линейным генератором (рис. 1).

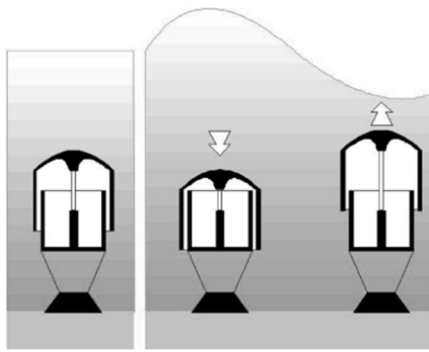


Рис. 1. Общий вид установки с поплавком и линейным генератором

Устройство целиком погружается под воду и устанавливается на дно шельфа, но оно содержит внутреннюю воздушную камеру, способную перемещаться вертикально в некоторых пределах. Под действием столба воды под набежавшей волной происходит уменьшение объёма камеры (опускание поплавка). После прохождения волны поплавок всплывает, увеличивая объём камеры. При этом происходит линейное перемещение частей камеры друг относительно друга. Линейный генератор встраивают внутрь камеры так, чтобы вертикальное перемещение его частей друг относительно друга приводило к преобразованию механического перемещения в электрическую энергию.

В некоторых случаях применяют поплавок на поверхности, перемещающийся вместе с волной и соединённый тросом с подвижной частью генератора на дне моря. В любом случае генератор имеет подвижную часть (транслятор) и неподвижную, укреплённую на основании устройства.

В статье рассматриваются различные типы электрических машин, которые можно использовать в данной установке в качестве линейного генератора возвратно-поступательного действия. Для адекватного сравнения различных генераторов одинаковой выходной мощности вводится экономический критерий затрат, равный стоимости активных частей генератора плюс стоимость потерь энергии в самом генераторе в течение 5 лет эксплуатации. Рассмотрены следующие виды электрических машин: асинхронный генератор без сердечника на трансляторе, асинхронный генератор с сердечником на трансляторе, вентильно-индукторный генератор, синхронный генератор с постоянными магнитами и беспазовым статором и синхронный генератор с постоянными магнитами и зубчатым статором. Ко всем машинам применены общие принципы конструирования, что позволило провести их адекватное сравнение. Наименьшее

значение критерия затрат оказалось у синхронного генератора с постоянными магнитами и зубчатым статором. У него получилась наименьшая стоимость активных материалов и наименьшие потери энергии в процессе эксплуатации. Конструкция синхронного генератора с постоянными магнитами показана на рис. 2.

Кроме того, в статье рассматривается новая конструкция линейного генератора с поперечным магнитным потоком (transverse flux). В предложенной конструкции обмотка, массив постоянных магнитов и концентраторы потока расположены на статоре, а подвижная часть содержит лишь стальные сердечники простейшей прямоугольной формы (рис. 3).

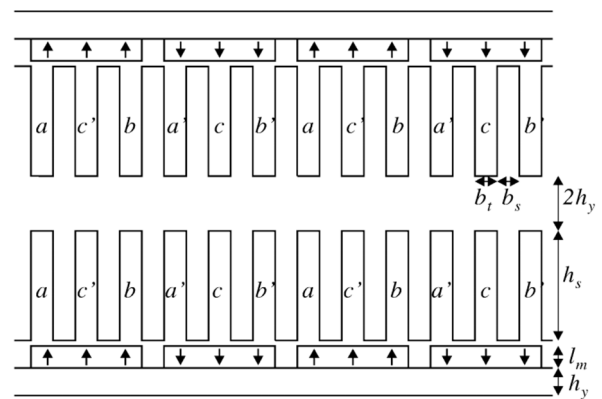


Рис. 2. Линейный синхронный генератор с постоянными магнитами

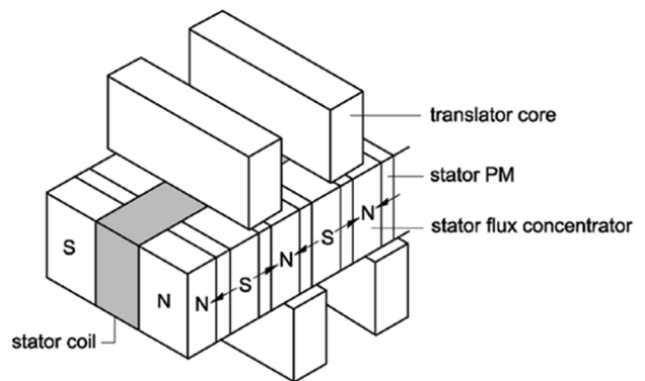


Рис. 3. Новая конструкция линейного генератора с поперечным потоком

Подобные электрические машины пока принято относить к новым типам машин, хотя первоначальная идея появилась более 100 лет назад. Однако сложность сборки такой машины, как и отсутствие проработанных аналитических моделей превращает их в весьма экзотический вариант. В рассматриваемой статье благодаря специальным мерам по

снижению потерь от вихревых токов удалось получить конструкцию, сопоставимую по стоимости материалов с разработанным ранее синхронным линейным генератором с постоянными магнитами, но обладающую меньшими потерями энергии. Авторы считают необходимым продолжить углублённый анализ такой конструкции.

В диссертации Ивановой И.А. [2] подробно исследуется погружной линейный генератор, индуктор и статор которого выполнены в виде нескольких секторов, расположенных по окружности (рис. 4).

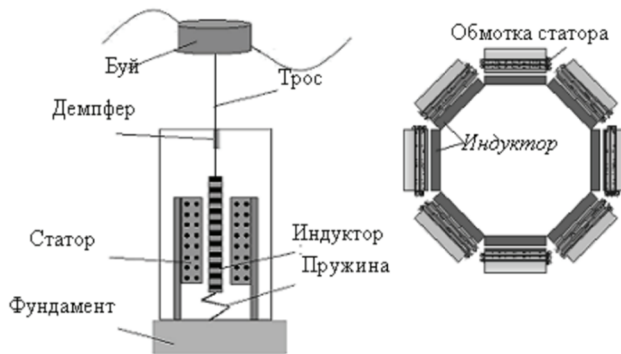


Рис. 4. Принципиальная конструктивная схема исследуемого генератора

Каждая пара индуктор-статор представляет собой плоский линейный генератор, но значительные размеры установки позволяют разместить несколько таких машин по окружности, образовав многоугольную конструкцию. Статор установки укреплен на фундаменте, расположенном на морском дне, а индуктор соединён тросом с буюм и связан пружиной с фундаментом. Индуктор содержит постоянные магниты из композиционного материала NiFeV.

В диссертации приведён учёт переменной скорости движения индуктора, выполнена количественная оценка влияния пазовой геометрии статора, размеров и формы магнитов на величину первой гармоники индукции, показана неэффективность последовательного соединения двух однофазных генераторов, работающих на общий выпрямитель.

Вопросы управления работой линейных генераторов, преобразующих энергию морских волн, рассматриваются в статье [3]. В ней в качестве генератора изначально рассматривается вариант линейной электрической машины с поперечным магнитным потоком (рис. 5).

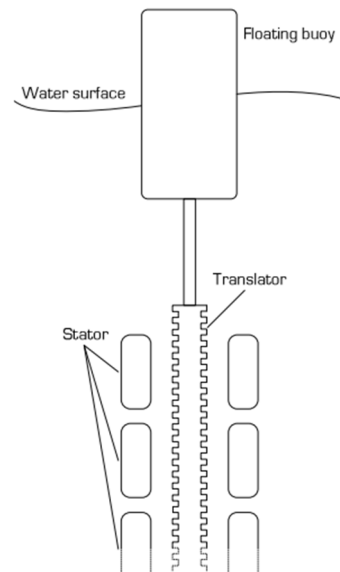


Рис. 5. Общая схема установки прямого преобразования энергии волн в электроэнергию

Классическая машина с поперечным магнитным потоком может развивать удельную силу (тормозное усилие генератора, работающего на соответствующую нагрузку) до 200 кН/м^2 , что в 10 раз больше традиционного линейного генератора. То есть такой генератор будет меньше и легче традиционного линейного генератора той же номинальной мощности. Правда, присущая машине с поперечным магнитным потоком значительная индуктивность означает, что эта машина имеет очень низкий коэффициент мощности, что серьёзно снижает её привлекательность при работе на полную мощность. Другим недостатком является сложная пространственная конструкция машины, приводящая к высокой стоимости изготовления машины.

Большие значения индуктивности являются отличительной чертой машины с поперечным магнитным потоком, которая в значительной мере обеспечивает её высокие удельные показатели по усилию/мощности. В рассматриваемой статье авторы ссылаются на свои разработки компромиссных конструкций, считая свою машину цилиндрической конструкции приемлемым компромиссом: она обладает значительно меньшими удельными показателями, но обеспечивает заметно больший коэффициент мощности, использует простую конструкцию статора и допускает использование традиционных уплотнителей.

Необходимость управления работой генератора, преобразующего энергию морских волн, связана с естественным желанием получить от него максимальную электрическую энергию в условиях слу-

чайно изменяющихся с течением времени морских волн. С одной стороны, максимальная выходная мощность получается в весьма узком диапазоне частот перемещения транслятора (в зоне резонанса), с другой стороны, выходная мощность должна быть ограничена во время штормов с чересчур высокими волнами. В статье рассматриваются математические модели механической и электрической подсистем, показана необходимость обеих подсистем подстройки в резонанс, а также делается вывод о необходимости использования активного управляемого выпрямителя. Дополнительные расходы на выпрямитель окупятся получением дополнительной энергии, которую можно будет извлечь из энергии морских волн.

Статья румынских авторов [4], кроме оценки потенциала энергии волн всего мирового океана (отдельно Чёрного моря и черноморского побережья Румынии), рассматривает различные конфигурации линейных генераторов, которые используются для преобразования энергии волн в электрическую энергию. Наиболее эффективными по мнению авторов являются системы прямого преобразования (*direct drive take off system*), состоящие из большого числа линейных генераторов, приводимых в движение буями на поверхности моря, и преобразовательной подстанции, расположенной на берегу (рис. 6).

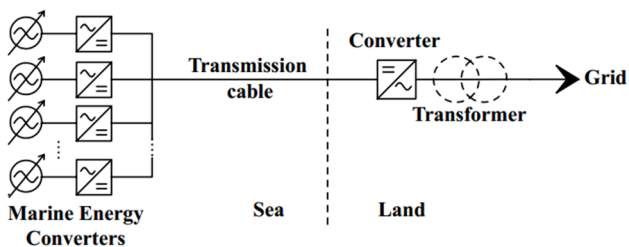


Рис. 6. Система преобразования энергии волн в электрическую энергию

Генераторы формируют электроэнергию переменного тока, которая сразу выпрямляется и по подводному кабелю передается на берег. Подстанция получает энергию постоянного тока от всех генераторов и преобразует её в энергию переменного тока постоянной частоты, что обеспечивает требуемое качество энергии. Выход подстанции через трансформатор подключается к сети.

Среди различных конфигураций линейных генераторов авторы выделяют три наиболее перспективные: линейные синхронные машины с постоянными магнитами (с поверхностными и встроенными магнитами), гибридные линейные машины

Вернье (Vernier) и цилиндрические машины с постоянными магнитами и воздушной катушкой на статоре (соленоидного типа).

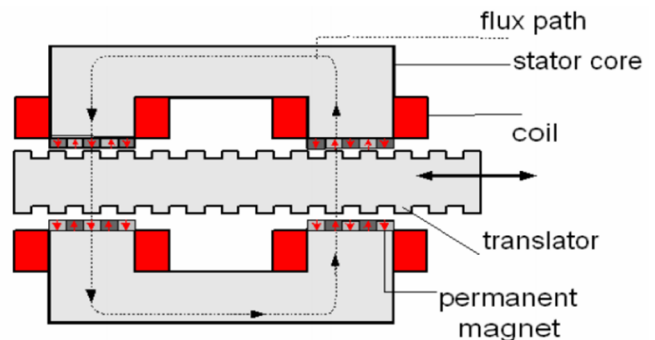


Рис. 7. Гибридная линейная машина Вернье

Конструкция линейной синхронной машины уже описывалась ранее. Авторы также полагают её хорошо известной и не уделяют ей серьёзного внимания. Схема гибридной линейной машины Вернье показана на рис. 7. На рисунке показан один модуль, хотя вся машина может иметь несколько таких модулей, образуя многофазное напряжение. Каждый фазный модуль независим от остальных, в том числе в магнитном отношении. Модуль содержит С-образный сердечник с катушкой, на полюсах которого расположены постоянные магниты чередующейся полярности. Напротив полюсов с магнитами расположены открытые пазы линейного транслятора, ширина и расположение которых определяют замыкание потока между сердечниками статора и транслятора. Постоянные магниты образуют магнитный поток, изменяющийся вследствие движения транслятора относительно статора. Это приводит к изменению потока сцепления обмотки и наведению в ней ЭДС. Различные модули расположены таким образом, что наводимые в их обмотках ЭДС оказываются смещены по фазе, образуя многофазную систему напряжений.

Фактически, эта машина работает по принципу индукторного генератора.

На рис. 8. показана конструкция цилиндрической машины с постоянными магнитами на трансляторе и воздушной катушкой на статоре. Эта катушка не имеет сердечника и представляет собой соленоид. При перемещении транслятора относительно катушки в последней наводится ЭДС, а размещение нескольких таких катушек в определенных местах относительно магнитных полюсов транслятора позволяет создавать многофазные системы напряжения.

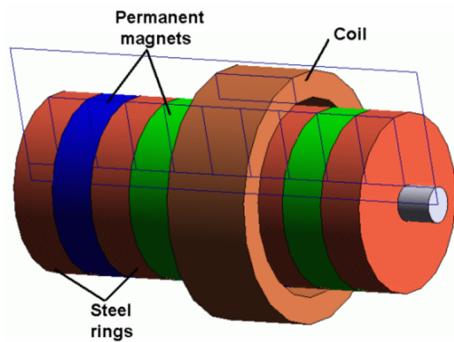


Рис. 8. Цилиндрическая машина соленоидного типа

Отметив сильные и слабые стороны рассмотренных конструкций, авторы в заключение рекомендуют также рассмотреть вариант машины с поперечным магнитным потоком, считая его перспективным для применения в тихоходных преобразователях со значительными усилиями, что характерно для случая использования энергии волн.

Итальянские исследователи в работе [5] также выбрали трубчатый линейный синхронный генератор с постоянными магнитами в качестве наиболее подходящего варианта для преобразования энергии волн. Поскольку их не ограничивают размеры установки, авторы выбрали вариант с длинным транслятором, содержащим большое число постоянных магнитов и относительно короткий статор с модульными кольцевыми обмотками, наводящими ЭДС разных фаз (рис. 9).

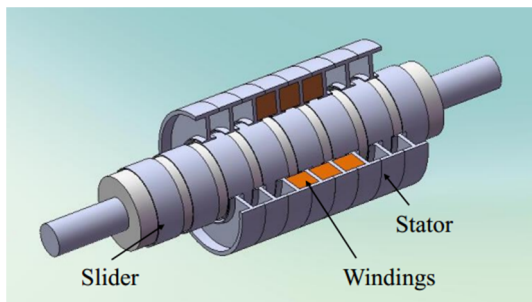


Рис. 9. Цилиндрический линейный синхронный генератор с постоянными магнитами

В данном генераторе максимальная скорость перемещения транслятора составляет 0,5 м/с. Транслятор представляет собой пустотелый вал с кольцевыми постоянными магнитами на нём и стальными промежутками между магнитами. Магниты с продольной намагниченностью выполнены из материала типа N42 с коэрцитивной силой 955 кА/м и остаточной индукцией 1,32 Тл.

В работе с помощью предложенной математической модели проводится оптимизация основных

размеров генератора с целью получения максимальной электрической энергии из механической энергии движения транслятора. В качестве результата авторы предлагают использовать оптимальные диапазоны выбора относительных размеров: высоты ярма статора, высоты и ширины зубца статора, толщины сердечника на трансляторе. Предложенная простая модель генератора позволяет быстро оценить амплитуды и форму кривых изменения потоков и наводимых ЭДС.

Активная подвеска автомобиля/система стабилизации

Линейные машины с ограниченным ходом транслятора и значительными развиваемыми усилиями рассматриваются в качестве исполнительных механизмов для линейного перемещения деталей подвески автомобиля (стабилизация кузова автомобиля в движении по плохой дороге). В исполнительных механизмах линейные электрические машины работают в двигательном режиме, но вопросы выбора оптимальной конструкции машины и её параметров для генераторов и двигателей схожи. К тому же, система активной подвески может использовать наводимую в электромеханическом амортизаторе электроэнергию для подзарядки аккумулятора, хотя это и усложняет систему управления.

В статье [6] рассматривается применение цилиндрического линейного вентильного двигателя с постоянными магнитами в качестве основы активной подвески автомобиля. Предложенная конструкция и система управления позволили такому амортизатору поглощать до 78% дорожных неровностей.

Линейный двигатель рассматривается многими как идеальный исполнительный механизм в системе активной подвески – он позволяет преобразовывать управляющий сигнал непосредственно в линейное перемещение транслятора без промежуточных преобразований вида движения. В линейном двигателе можно обеспечить плавное и точное перемещение транслятора и легко подстраивать его под конкретное применение с помощью системы управления. В рассматриваемой статье активная подвеска проектировалась и испытывалась для активного противодействия колебаниям с частотой около 3,5 Гц (20 рад/с), к которой очень чувствительно человеческое тело. Спроектированный линейный двигатель способен создавать усилие до 29,6 Н при потреблении фазного тока до 6 А. Двигатель использует редкоземельные постоянные

магниты NdFeB, которые размагничиваются при повышении температуры до 150 °С, поэтому контроллер блока питания двигателя содержит ограничители тока.

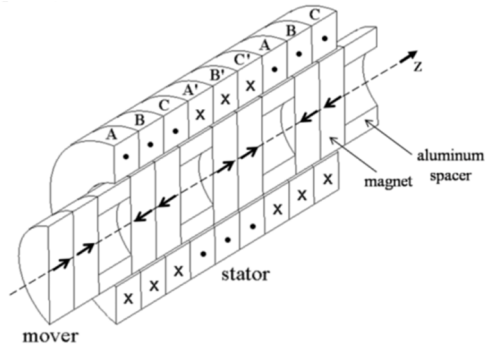


Рис. 10. Конструкция линейного вентильного двигателя

Конструкция разработанного двигателя показана на рис. 10.

Транслятор линейного двигателя содержит цилиндрические постоянные магниты с продольной намагниченностью, образующие последовательность магнитных пар NS–NS–SN–SN. Между парами магнитов одинаковой полярности расположены вставки, работающие как концентратор магнитного потока. Все цилиндрические магниты помещены внутрь бронзовой втулки, которая и передаёт развиваемое усилие на кузов автомобиля (или испытательный стенд в данном случае). Статор содержит 9 цилиндрических катушек (по 3 на фазу), направление тока в которых показано на рисунке. Фазные катушки питаются переменным током.

Для расчёта создаваемого тягового усилия использовано простое представление силы как векторного произведения плотности тока и индукции, которое для данной линейной машины записано с помощью обратного преобразования Blondеля.

Для испытания была создана модель четвертой части автомобиля – одно колесо на подвеске, которая подвергалась механическим колебаниям, а задачей линейного двигателя и его системы управления была компенсация этих колебаний с помощью развиваемых двигателем усилий.

В статье рассматривается несколько законов управления, включая системы нечёткой логики и делается вывод о предпочтительности использования несимметричного контроллера нечёткой логики, хотя и признаётся сложность его первоначального программирования.

Готовая к применению система активной подвески на базе линейной электрической машины

представлена компанией Bose [7]. Эта система успешно справляется с демпфированием колебаний кузова автомобиля при движении по неровной дороге или в повороте.

В основе такой системы – линейная электрическая машина, монтируемая в подвеску автомобиля вместо амортизатора (рис. 11). Такая машина работает в двигательном режиме для активной компенсации дорожных неровностей, а может использоваться и как генератор для получения электрической энергии из колебания подвески, что также несколько демпфирует колебания.

Конструкция линейной электрической машины вполне традиционна: она имеет цилиндрическую форму, содержит постоянные магниты на трансляторе, являющемся частью штока системы подвески, и кольцевые катушки обмотки статора, создающие тяговое усилие во взаимодействии с полем постоянных магнитов.



Рис. 11. Линейные электродвигатели в подвеске автомобиля

Принципиальным недостатком такой подвески является то, что она работает лишь в динамических режимах и не способна удерживать статическую нагрузку – вес неподвижного автомобиля. Кроме того, она весьма затратна: не считая стоимости самой подвески и системы управления каждый линейный двигатель потребляет до нескольких десятков киловатт электроэнергии (пиковая мощность). Это объясняет, по-видимому, тот факт, что примеров коммерческого использования такой подвески обнаружить не удалось. Более предпочтительными выглядят исследования активной электромагнитной подвески с линейным электродвигателем, встроенным внутри традиционного амортизатора, либо пружины.

Электрические генераторы с двигателем Стирлинга

Линейный генератор возвратно-поступательно-го действия представляет особый интерес в качестве эффективного преобразователя механической энергии в электрическую для автономных установок, расположенных в труднодоступных местах. Непосредственное использование линейного движения (*direct drive*) вместо применения промежуточного механического преобразователя возвратно-поступательного движения во вращательное обещает повышение эффективности работы всей генераторной установки. Для автономного источника энергии это означает более долгий срок работы на том же запасе топлива. Подобные источники энергии используют для питания метеорологических, навигационных и телекоммуникационных устройств, расположенных в труднодоступных местах Арктики и Антарктики или в горной местности. Те же требования предъявляются к космическим аппаратам, совершающим многолетние путешествия в межпланетном пространстве либо длительную работу на орбите без перспектив пополнения запасов топлива. Как правило, мощности таких установок невелики, но они должны работать годами.

Особое внимание таким автономным источникам энергии уделяет NASA, реализуя программу радиоизотопных энергетических систем (*Radioisotope Power Systems (RPS) Program* – [8]). Радиоизотопные энергетические системы представляются перспективной альтернативой солнечным батареям или аккумуляторам на борту. RPS обеспечивает надежное, длительное и точно прогнозируемое поступление энергии вне зависимости от условий работы. Срок службы подобных систем легко превышает 10 лет благодаря использованию хорошо известных материалов на основе плутония Pu-238 с периодом полураспада 87,7 лет. Ранее RPS успешно применялись NASA в виде радиоизотопного термоэлектрического генератора в миссиях Аполло, Викинг, Вояджер и Галилео. Сейчас NASA разрабатывает новое поколение RPS, используя более эффективные преобразователи тепловой энергии в электричество. Среди направлений исследования: двигатели Стирлинга, линейные генераторы, магнитотвердые материалы, материалы для теплоизоляции и теплопереноса. Линейные генераторы разрабатываются собственным департаментом (*Department of Energy*) и компаниями Lockheed-Martin (LM) и Sunpower.

Для испытания разрабатываемых образцов линейных генераторов NASA использует испы-

тательный стенд собственной разработки [9]. Стенд позволяет испытывать генераторы мощностью порядка сотен Вт при изменяемом ходе штока до 13 мм и изменяемой частоте колебаний до 120 Гц.

Хорошим примером современных разработок генераторов для двигателя Стирлинга в рамках программы RPS является статья [10]. В статье описывается работа над источником энергии мощностью 5 кВт, с общей удельной мощностью 140 Вт/кг, сроком службы не менее 5 лет и системой управления, обеспечивающей безопасную эксплуатацию устройства в аварийных ситуациях. Базовый модуль мощностью 5 кВт должен работать в паре с таким же, но включённым встречно для гашения вибраций. Несколько 10 киловаттных пар образуют единую энергетическую установку, способную снабжать электроэнергией установки новой лунной программы NASA. Каждый модуль содержит двигатель Стирлинга, получающий тепловую энергию вместе с остальными модулями от радиоизотопного источника. Контроллер модуля должен защищать преобразователь от внезапного отключения и короткого замыкания, а также управлять мощностью в диапазоне от 50% до 120% от номинала. Кроме того, в функции контроллера входит проверка температурных режимов с защитой от перегрева и контроль перемещения поршней для обеспечения безопасной эксплуатации двигателя Стирлинга. Генератор модуля должен формировать напряжение переменного тока с действующим значением 400 В и частотой 85 Гц, что обусловлено выбранной NASA распределительной электрической системой лунной программы. Общий вид преобразователя показан на рис. 12. Опуская подробности работы и устройства двигателя Стирлинга отметим здесь, что электрический генератор, размещённый на поршне двигателя, разрабатывается Clever Fellows Innovative Consortium на основе серии STAR 241. Транслятор установлен в гибких подшипниках из аустенитной нержавеющей стали и снабжён постоянными магнитами Sm-Co, способными работать при температуре до 450 °С. Величина хода транслятора составляет 22 мм, обеспечивая выходную мощность модуля на уровне 5 кВт. Ход может быть увеличен до 24 мм для обеспечения 6 кВт на выходе. Шихтованный сердечник выполнен из материала Hiperco 50. Подобные устройства выдерживают 650 тыс. часов безаварийной работы. КПД генератора составляет 87,5%.

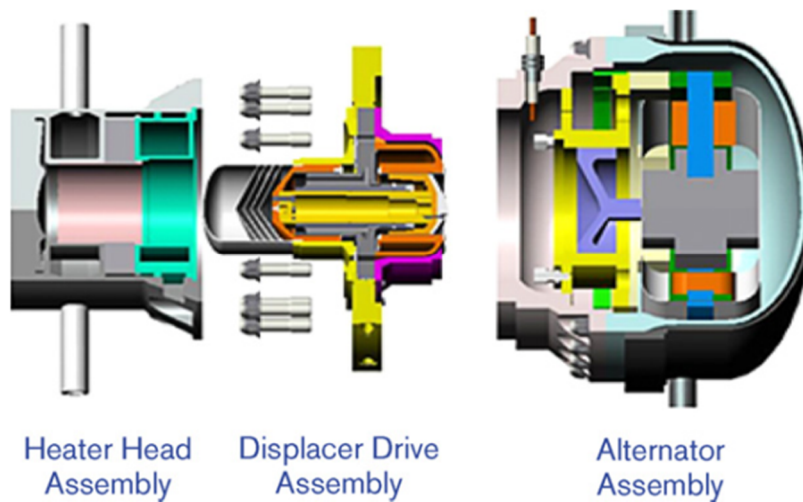


Рис. 12. Преобразователь энергии с двигателем Стирлинга

Генератор, встроенный в двигатель внутреннего сгорания со свободным поршнем

Повышенный интерес к линейным генераторам возвратно-поступательного действия связан с актуальной сейчас темой гибридизации транспортных средств.

Использование электрической энергии для привода транспортного средства наряду с сохранением двигателя внутреннего сгорания в качестве основного источника энергии обусловлено не только стремлением экономить топливо, используя его более рационально и запасая часть энергии впрок, но и ужесточением экологических требований к автомобилям. В гибридном транспортном средстве двигатель внутреннего сгорания может работать в оптимальном режиме, как с точки зрения эффективности, так и чистоты выхлопа, а регулирование энергетических потоков осуществляется на стороне электрической части трансмиссии. В случае последовательной гибридной схемы трансмиссии двигатель внутреннего

сгорания уже не связан с механическим валом, и отпадает необходимость в преобразовании поступательного движения поршня во вращательное движение вала, ведь преобразовывать механическую энергию в электрическую можно с помощью линейного генератора. Тут на первый план выходит концепция двигателя внутреннего сгорания со свободным поршнем, совершающим возвратно-поступательные движения с интегрированным в него линейным электрическим генератором.

Конструкции подобных двигателей внутреннего сгорания со свободным поршнем могут различаться. На рис. 13 показан двухцилиндровый двигатель оппозитной конструкции с двумя камерами сгорания и двумя поршнями, соединёнными жёстким штоком. Чередующиеся циклы сгорания топлива в противоположных камерах сгорания обеспечивают возвратно-поступательное движение штока, в средней части которого расположен линейный электрический генератор [11].

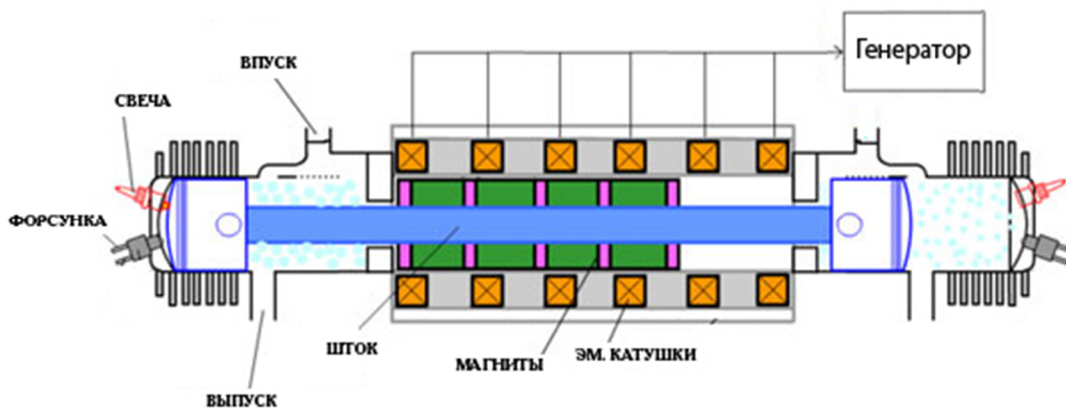


Рис 13. Оппозитный двигатель со свободным поршнем



Рис. 14. Двигатель с двумя поршнями и центральной камерой сгорания

Подобная конструкция оказывается несбалансированной в механическом отношении и должна вызывать повышенные вибрации в процессе работы. Более сбалансированной представляется конструкция с центральной камерой сгорания и двумя цилиндрами, двигающими свои поршни одновременно в противоположных направлениях на каждом цикле сгорания топлива (рис. 14) [12].

Однако, с точки зрения линейного электрического генератора, предназначенного для преобразования механической энергии перемещения штока в электрическую энергию, обе эти конструкции оказываются идентичны. Разница может проявляться лишь в единичной мощности генератора. Поэтому в дальнейшем конкретная конструкция двигателя внутреннего сгорания, в который должен быть встроен линейный генератор, будет интересовать нас лишь с точки зрения внешних ограничений по длине, диаметру, ходу поршня и рабочей температуре.

Как отмечается в докладе [13], применение линейной электрической машины в сочетании с двигателем внутреннего сгорания со свободным поршнем даёт сразу несколько очевидных преимуществ:

- исключение механического преобразователя вида движения и снижение числа движущихся деталей за счёт исключения коленчатого вала и шатунов позволяет повысить эффективность работы всей установки и её надёжность;
- повышение жёсткости и механической надёжности конструкции двигателя;
- возможность динамического изменения степени сжатия в процессе работы путём установки параметров системы управления, реализация различных режимов сгорания топлива позволяют получить в одном устройстве возможность работы с различными видами топлива;
- исключение стартера для запуска ДВС, поскольку обратимая электрическая машина может

использоваться как в генераторном, так и в двигательном режиме работы;

- отсутствие механической связи двигателя с трансмиссией транспортного средства ведет к свободной компоновке двигательной установки, а использование модульной конструкции упрощает наращивание мощности транспортного средства в зависимости от его назначения.

При этом рассматриваемая конструкция имеет ряд очевидных недостатков или проблем, требующих отдельного решения:

- термоизоляция между камерой сгорания и генераторной частью для обеспечения приемлемых рабочих температур в генераторе;
- высокая величина циклически повторяющихся сил, действующих на шток и индуктор и способных разрушить хрупкий материал постоянных магнитов;
- изменение рабочих характеристик постоянных магнитов под влиянием тепловых потоков и знакопеременных нагрузок.

Надо признать, что, несмотря на большое число исследований и соответствующих публикаций в журналах и трудах конференций, посвященных разным аспектам разработки линейных генераторов со свободным поршнем, готовых коммерческих установок найти не удалось.

В статье [14] рассматриваются современные технологии гибридизации автотранспорта, позволяющие увеличить пробег электрического автомобиля за счёт дополнительных источников энергии с двигателем внутреннего сгорания. Все они предполагают использование электрического генератора на финальной стадии преобразования энергии.

Моделирование работы линейного электрического генератора, используемого в гибридном транспортном средстве, приведено в статье [15]. Мощность генератора составляет 15 кВт при общем КПД установки 42,5%. Сам электрический генератор имеет КПД 92 %. Рассматриваемая уста-

новка содержит одну камеру сгорания с двумя поршнями, работающими в противофазе, и два линейных генератора на противоположных концах (рис. 15).

На торцах электрических генераторов установлены пружины, запасующие механическую энергию при расширении газов и высвобождающие её при сжатии. Общая модель линейного генератора включает в себя давление газа в камере сгорания, электромагнитное тормозное усилие электрического генератора и упругую силу пружины. Полная модель реализована в среде Matlab/Simulink.

В статье [16] приведено теоретическое и экспериментальное исследование относительно новой конструкции линейного генератора со свободным поршнем. В этой компактной конструкции на одном конце двойного поршня расположена камера сгорания. На другом конце поршня расположена камера регулируемой газовой пружины, которая запасает часть кинетической энергии поршня во время расширения газа и возвращает эту энергию при обратном ходе. Сам поршень имеет ступенчатую форму, названную W-образной (рис. 16).

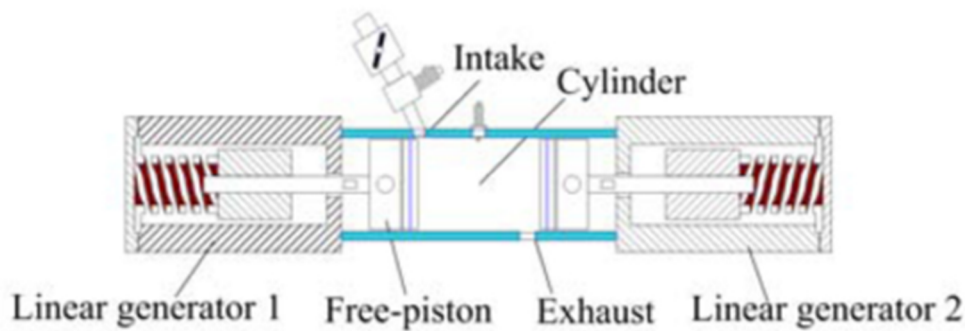


Рис. 15. Общая компоновка установки

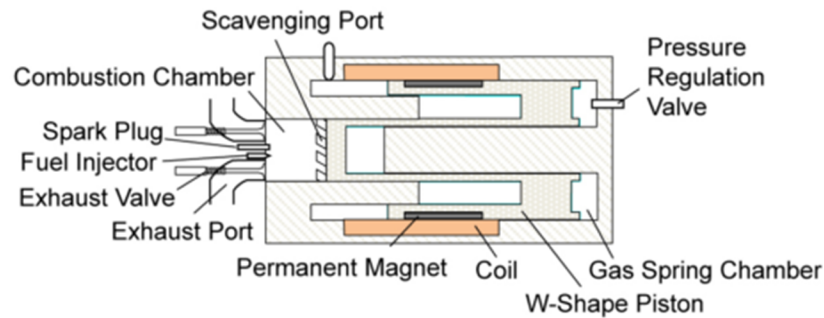


Рис. 16. Линейный двигатель с W-образным поршнем

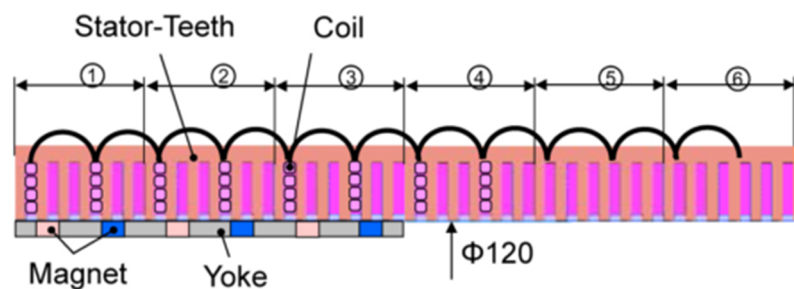


Рис. 17. Цилиндрический линейный генератор

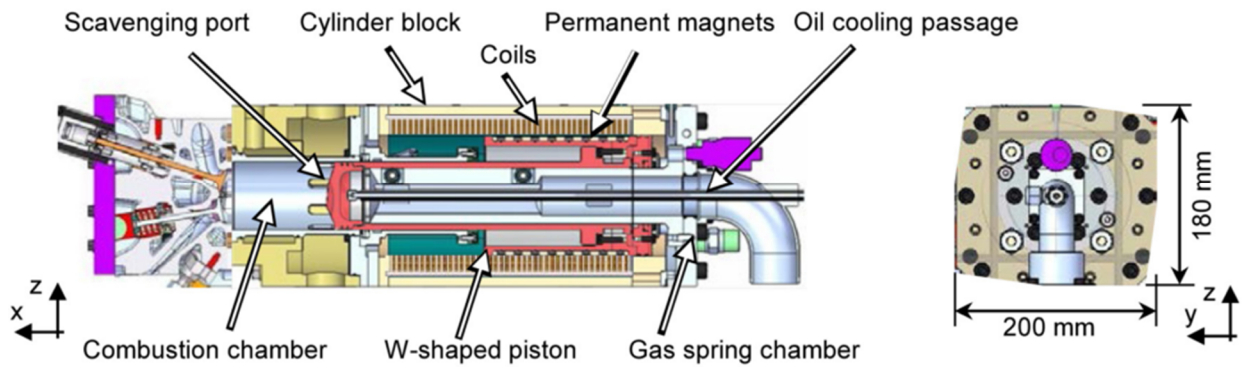


Рис. 18. Прототип двигателя со свободным поршнем

Транслятор электрического генератора расположен на внешней поверхности поршня, а вокруг него расположен статор генератора. В силу ступенчатой формы поршня постоянные магниты на трансляторе расположены максимально далеко от камеры сгорания, что предотвращает их нагрев до высоких температур, угрожающих потерей магнитных свойств. Конструкция цилиндрического линейного генератора показана на рис. 17.

Генератор представляет собой трёхфазный бесконтактный генератор с постоянными магнитами NdFeB. Статор имеет 6 пар полюсов по 6 пазов на каждом периоде. Схема обмотки также показана на рис. 17. Внутренний диаметр статора составляет 120 мм. Ход транслятора составляет 100 мм. Генератор должен выдавать мощность 10 кВт, теоретический максимум составляет 12,7 кВт. Общая эффективность установки должна составлять 42%.

Теоретические исследования сопровождались созданием и испытанием прототипа, показанного на рис. 18.

При теоретических исследованиях предполагалось, что электрический генератор питает нагрузку, величина которой может изменяться. Однако на практике такой алгоритм управления недостаточен. При работе свободнопоршневого двигателя возможны соударения поршня с головкой цилиндра или стенкой газовой пружины из-за чрезмерной скорости поршня, либо остановка поршня из-за пропуска зажигания или других отклонений. Поэтому контроллер был сделан так, чтобы обеспечивать требуемую степень сжатия. Для этого нагрузка генератора должна быть выбрана не постоянной, а переменной величиной, определяемой по сигналам обратной связи по положению и скорости поршня. Опорные значения положения и скорости выбирались на основании предварительного моделирования работы системы.

В свободнопоршневом двигателе отсутствует кривошип, и положение поршня не может быть однозначно задано угловым положением кривошипа. Именно поэтому информация о положении поршня необходима для управления не только моментами впрыска топлива, зажигания, открывания и закрывания клапанов, но также и для управления режимами нагрузки линейного генератора или питания линейного двигателя. В прототипе отклонение действительного положения поршня от стандартного определялось с помощью подсчёта ряда насечек на внешней поверхности цилиндра с помощью датчиков, расположенных на внутренней поверхности блока цилиндров.

В процессе испытаний прототипа удалось получить устойчивую работу свободнопоршневого двигателя с частотой 23 Гц при требуемой частоте 40 Гц. Контроллер показал свою применимость для управления положениями поршня, хотя траектория движения пока не оптимальна. Контроллер определял положение поршня относительно требуемого с погрешностью 0,5 мм, и этого хватило, чтобы обеспечить непрерывную работу двигателя в течение более чем 4 часов.

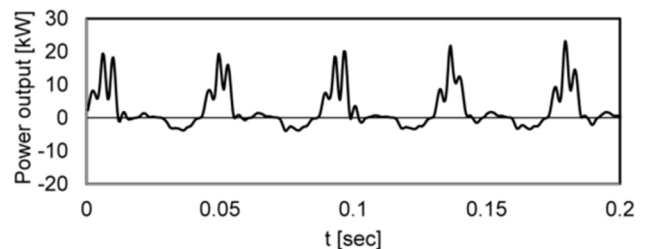


Рис. 19. Кривая изменения электрической мощности генератора

На рис. 19 показано изменение мгновенной мощности генератора в процессе испытаний. На нём положительные значения соответствуют мощ-

ности, отдаваемой генератором в нагрузку, а отрицательные – потреблению мощности для питания обмоток с целью создания корректирующих усилий.

Контроль положения поршня в двигателе со свободным поршнем

В статье, описывающей испытания прототипа свободнопоршневого двигателя с линейным генератором, уже было уделено много внимания необходимости управления электрической машиной с целью обеспечения управления положением поршня. В ряде статей подробно рассматриваются вопросы управления.

В статье [17] рассматривается несколько законов управления свободнопоршневым двигателем. При этом за базу взяты следующие воздействия. Входными переменными для двигателя являются масса впрыскиваемого топлива, масса воздуха в камере воздушной пружины и усилие, развиваемое электрической машиной (тормозное усилие в генераторном режиме или тяговое усилие в двигательном режиме). Выходными величинами являются скорость поршня и положения поршня в крайних точках. Эти выходные величины, характеризующие состояние двигателя, поступают на вход контроллера, который и формирует сигналы управления массой впрыскиваемого топлива и массой воздуха, закачиваемого в камеру воздушной пружины.

Управление положением поршня в динамике рассматривалось для разных типов контроллеров, реализующих различные способы управления путем моделирования полного цикла хода поршня.

Авторы статьи [18] отмечают, что проведенные исследования позволяют успешно решить такие проблемы, возникающие при работе свободнопоршневого двигателя, как пуск двигателя, активация клапанов и неправильное сгорание топлива. Но актуальной остаётся проблема управления перемещением поршня при изменении нагрузки, при котором крайние точки положения поршня должны обеспечиваться с высокой точностью. Целью оптимального управления авторы считают обеспечение непрерывного потока мощности в нагрузку от линейного электрического генератора. При этом основными контролируемыми переменными должны быть скорость подачи топлива и моменты срабатывания клапанов в камере воздушной пружины, регулирующие объём воздуха внутри этой камеры. Авторы отмечают, что контролируемые переменными могут также быть моменты впрыска топлива и открытия выпускного клапана в камере зажигания, но эти переменные имеют ограниченное влия-

ние на динамику двигателя и могут использоваться лишь для дальнейшей оптимизации работы двигателя. Затем с помощью модели одного цикла работы двигателя авторы исследуют различные законы управления.

Заключение

Вопросы создания линейных электрических машин для прямого преобразования механической энергии возвратно-поступательного движения в электрическую энергию и обратно занимают значительное место в исследованиях последних 10 – 15 лет. Такое повышенное внимание к линейным машинам обусловлено двумя основными общемировыми тенденциями. Во-первых, глобальный тренд на экономию энергетических ресурсов вообще и снижение вредных выбросов на транспорте в частности стимулирует развитие гибридизации транспортных средств. Под гибридизацией здесь понимается внедрение в трансмиссию автомобиля электромеханического преобразователя энергии, работающего параллельно или последовательно с двигателем внутреннего сгорания. А электрический генератор, работающий от двигателя внутреннего сгорания, целесообразно сделать линейным, использующим возвратно-поступательное движение поршней, чтобы избежать излишних механических потерь при преобразовании возвратно-поступательного движения во вращательное. Во-вторых, улучшение свойств активных материалов, особенно постоянных магнитов, и повышение надёжности силовой электроники делают линейные генераторы, работающие через активный выпрямитель, достойными конкурентами традиционным конструкциям электрических машин. Современные генераторы на постоянных магнитах отличаются высокими плотностями энергии, современные магниты не боятся высоких температур, а современная силовая электроника позволяет нивелировать постоянные изменения выходного напряжения генератора по величине и частоте, обусловленные возвратно-поступательным движением индуктора.

Настоящая статья подготовлена в рамках Соглашения о предоставлении субсидии No.14.577.21.0120 (Уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57714X0120) при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Исследования выполнены в Московском государственном машиностроительном университете (МАМИ) и Национальном исследовательском университете «МЭИ».

Литература

1. Conventional and Tfpm Linear Generators for Direct-Drive Wave Energy Conversion. Polinder Henk at al. // Ieee transactions on energy conversion. – 2005, june. – Vol. 20. – No. 2.
2. Иванова И. А. Исследование и разработка магнито-электрического линейного генератора для преобразования энергии морских волн // Дисс. на соиск. степ. канд. техн. наук. – СПб., 2006.
3. Shek Jonathan, Macpherson Ewen, Mueller Markus. Control of Linear Electrical Generators for Direct Drive Wave Energy Conversion // International Conference on Electrical Machines, 2006, September.
4. Szabó, L. and Oprea C. Linear Generators for Wave Power Plants to Be Set up Near the Romanian Coasts of the Black Sea // Oradea University Annals. Electrotechnical Fascicle, Computer Science and Control Systems Session, Oradea (Romania), 2006. – Pp. 120 – 125.
5. Pirisi A., Grusso G., Zich E. R. Novel Modelling Design of 3ph Tubular PM Linear generator for Marine Applications / Politecnico di Milano.
6. Lee Seungho and Kim Won-jong. Active Suspension Control with Direct-Drive Tubular Linear Brushless Permanent-Magnet Motor – 2009 // American Control Conference, Hyatt Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA, 2009, June 10 – 12.
7. Bose Suspension System: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.bose.com/controller?url=/automotive/bose_suspension/index.jsp. – (Дата обращения: 16.11.2014).
8. Radioisotope Power Systems (RPS) Program. NASA: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tec.grc.nasa.gov/rps/>. – (Дата обращения: 15.11. 2014).
9. Linear Alternator Research: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tec.grc.nasa.gov/rps/technology-advancement-project/linear-alternator-research>. – (Дата обращения: 15.11.2014).
10. Henry Jr., Brandhorst W., Peter Jr., Chapman A. New 5kW free-piston Stirling space convertor developments // Science Direct, Acta Astronautica 63 (2008), 342 – 347.
11. Энциклопедия «За рулем»: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: wiki.zr.ru/Двигатель_со_свободным_поршнем/. – (Дата обращения: 15.11.2014).
12. Нанотехнологии Nanonewsnet: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.nanonewsnet.ru. – (Дата обращения: 15.11.2014).
13. Духанин В. И. Автомобильный генератор возвратно-поступательного движения. Анализ конструкции // Международная научно-техническая конференция ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвящённая 145-летию МГТУ / Московский государственный технический университет «МАМИ», Москва, 2010, 17 нояб.
14. Ling Huang. Novel Range Extender Concepts for 2025 with Regard to Small Engine Technologies // SAE Int. J. Alt. Power., Vol. 1. – Issue 2 (December 2012).
15. Trattner A. at al. An Opposed-Piston Free-Piston Linear Generator Development for HEV // SAE International, 2012-01-1021.
16. Kosaka Hidemasa at al. Development of Free Piston Engine Linear Generator System Part 1 – Investigation of Fundamental Characteristics // SAE International, 2014.
17. Mikalsen R. и Roskilly A. P. The control of a free-piston engine generator. Part 2: Engine dynamics and piston motion control // Applied Energy 87 (2010) 1281 – 1287.
18. Mikalsen R., Jones E., Roskilly A. P. Predictive piston motion control in a free-piston internal combustion engine // Applied Energy 87 (2010) 1722 – 1728.

Поступила в редакцию 24. 11. 2015

Владимир Борисович Баль, канд. техн. наук., доцент,
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
balvb@mpei.ru.

Владимир Яковлевич Геча, д-р техн. наук, заместитель генерального директора,
АО «Корпорация «ВНИИЭМ»,
т. (495) 365-26-69, e-mail: vniiem@vniiem.ru.

Владимир Иванович Гончаров, ст. преподаватель,
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
goncharovvi@mpei.ru.

Евгений Викторович Ежов, инженер,
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
т. (495) 362-74-29.

Василий Германович Чиркин, аспирант,
Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Сергей Владимирович Ширинский, канд. техн. наук., доцент,
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
т. (495) 362-74-54, shirinskiisv@mpei.ru.

Лев Юрьевич Лежнев, канд. техн. наук., директор НТЦ «Силовые агрегаты»,
Университет машиностроения,
т. (495) 223-05-23 (доб. 1119), lev.lezhnev@gmail.com.

LINEAR ELECTRICAL RECIPROCATING MACHINES – APPLICATION

V.B. Bal, V.Ya. Gecha, V.I. Goncharov, E.V. Ezhov,
V.G. Chirkin, S.V. Shirinsky, L.Yu. Lezhnev

Review of projects and related published materials, considering application of electrical reciprocating machines, over the last 10 years is presented in the article. Sea water wave energy converters, use of linear motors in car active suspensions and stability control systems, independent supply sources on the basis of Stirling engine linear generators are considered. Use of explosion free-piston engines with built-in generators, as well as use of similar engines, for engine piston position control, is specially emphasized. Machine types, machine embodiment and test results are studied for all use alternatives. Theoretical studies of unconventional concepts are considered in short. In conclusion current interest to linear electrical machines is highlighted.

Key words: linear electrical machine, linear generator, linear electrical engine, electrical reciprocating engine, usage.

List of References

1. Conventional and TfpM Linear Generators for Direct-Drive Wave Energy Conversion. Polinder, Henk et al. // IEEE Conversion on energy conversion. – 2005, June. – Vol. 20. – No. 2.
2. Ivanova I. A. Analysis and Design of Electromagnetic Linear Generator for Sea Water Wave Energy Transformation – Ph. D. Thesis in Engineering Science. – St. Petersburg, 2006.
3. Shek Jonathan, Macpherson Ewen, Mueller Markus. Control of Linear Electrical Generators for Direct Drive Wave Energy Conversion // International Conference on Electrical Machines, 2006, September.
4. Szabó L. and Oprea C. Linear. Generators for Wave Power Plants to Be Set up Near the Romanian Coasts of the Black Sea // Oradea University Annals. Electrotechnical Fascicle, Computer Science and Control Systems Session, Oradea (Romania), 2006. – Pp. 120 – 125.
5. Pirisi A., Gruosso G., Zich E. R. Novel Modelling Design of 3ph Tubular PM Linear generator for Marine Applications / Politecnico di Milano.
6. Lee Seungho and Kim Won-Jong. Active Suspension Control with Direct-Drive Tubular Linear Brushless Permanent-Magnet Motor – 2009 // American Control Conference, Hyatt Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA, 2009, June 10 – 12.
7. Bose Suspension System: [Digital Resource]. – Available at: http://www.bose.com/controller?url=/automotive/bose_suspension/index.jsp. – (Accessed Date: 16.11.2014).
8. Radioisotope Power Systems (RPS) Program. NASA: [Digital Resource]. – Available at: <https://tec.grc.nasa.gov/rps/>. – (Accessed Date: 15.11.2014).
9. Linear Alternator Research: [Digital Resource]. – Available at: <https://tec.grc.nasa.gov/rps/technology-advancement-project/linear-alternator-research>. – (Accessed Date: 15.11.2014).
10. Henry Jr., Brandhorst W., Peter Jr., Chapman A. New 5kW free-piston Stirling space convertor developments // Science Direct, Acta Astronautica 63 (2008), 342 – 347.
11. Encyclopaedia ‘Za Rulem’ [Behind the Wheel] – Available at: wiki.zr.ru/Dvigatel_so_svobodnym_porshnem/. – (Accessed Date: 15.11.2014).
12. Nanotechnologies Nanonewsnes: [[Digital Resource]. – Available at: www.nanonewsnet.ru. – (Accessed Date: 15.11.2014).
13. Dukhanin V. I. Automotive reciprocating alternator. Design Analysis // International Scientific and Technical Conference of Automotive Engineer’s Association “Motor Vehicle and Tractor Industry in Russia: Development Priorities and Manpower Training” Dedicated to the 145 / Anniversary of MGTU ‘MAMI’ [Moscow State University of Mechanical Engineering]. – Nov.17, 2010.
14. Ling Huang. Novel Range Extender Concepts for 2025 with Regard to Small Engine Technologies // SAE Int. J. Alt. Power., Vol. 1. – Issue 2 (December 2012).
15. Trattner A. et al. An Opposed-Piston Free-Piston Linear Generator Development for HEV // SAE International, 2012-01-1021.
16. Kosaka Hidemasa et al. Development of Free Piston Engine Linear Generator System Part 1 – Investigation of Fundamental Characteristics // SAE International, 2014.
17. Mikalsen R. and Roskilly A. P. The control of a free-piston engine generator. Part 2: Engine dynamics and piston motion control // Applied Energy 87 (2010) 1281 – 1287.
18. Mikalsen R., Jones E., Roskilly A. P. Predictive piston motion control in a free-piston internal combustion engine // Applied Energy 87 (2010) 1722 – 1728.

- Vladimir Borisovich Bal**, Ph. D. (Tech.) Associate Professor,
National Research University 'MPEI'.
E-mail: balvb@mpei.ru.
- Vladimir Yakovlevich Gecha**, D. Sc. (Tech.), Deputy Director General.
JC 'VNIEM Corporation'.
Tel.: (495) 365-26-69.
E-mail: vniem@vniem.ru.
- Vladimir Ivanovich Goncharov**, Senior Lecturer.
National Research University 'MPEI'.
E-mail.: goncharovvi@mpei.ru.
- Evgeny Victorovich Ezhov**, Engineer.
National Research University 'MPEI'.
Tel.: (495) 362-74-29.
- Vasily Germanovich Chirkin**, Ph. D. Student.
National Research University 'MPEI'.
- Sergy Vladimirovich Shirinsky**, Ph. D. (Tech.).
National Research University 'MPEI'.
Tel.: (495) 362-74-54.
E-mail: shirinskiisv@mpei.ru.
- Lev Yuryevich Lezhnev**, Ph. D. (Tech.).
Director General of Research and Development Centre 'Power Units',
Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI).
Tel.: (495) 223-05-23 (ext.: 1119).
E-mail: lev.lezhnev@gmail.com.