

Силовая гибридная установка: проблемы и решения

В рамках Киотского протокола, подписанного в 1997 году, многие страны взяли на себя обязательства сократить вредные выбросы в атмосферу. Одним из инициаторов Протокола стала Япония, и многие крупные компании этой страны запустили ряд проектов, призванных снизить количество вредных выбросов в атмосферу. Еще в 1992 году была представлена Хартия Земли, впоследствии дополненная «Экологическим планом действий». Оба документа определили одно из приоритетных на сегодня направлений деятельности компаний — разработку новых, экологически чистых технологий.

На Всемирной конференции по климату, прошедшей в 2015 году под эгидой ООН в Париже, Великобритания, Германия, Норвегия, Нидерланды и несколько американских штатов приняли решение запретить через 35 лет использование автомобилей с двигателями внутреннего сгорания (ДВС).

Борьба за экологическую безопасность и топливную экономичность стала для многих стран чрезвычайно актуальной проблемой. Эта тема является одной из самых обсуждаемых на мировых конференциях, поскольку за три десятилетия аккумулирован мировой опыт производства и эксплуатации электромобилей и автомобилей, оснащенных силовыми гибридными установками.

Юрий Таланин

tyv1357@mail.ru

Электромобили

Сегодня в мире наиболее продаваемым электромобилем считается Nissan Leaf, оснащенный электродвигателем мощностью 109 л. с. Под днищем электромобиля установлена высоковольтная литий-ионная аккумуляторная батарея емкостью 24 кВт и весом почти 300 кг. Запас хода составляет 120–175 км, в зависимости от условий эксплуатации. Электромобиль Tesla Octavia Green E оснащен электродвигателем мощностью 114 л. с., высоковольтной батареей, состоящей из 180 литий-ионных аккумуляторов и расположенной под полом багажника и задней части салона.

Авиастроительный концерн Airbus совместно с компанией Aero Composite Saintonge разрабатывает электрический самолет E-Fan, оборудованный двумя электродвигателями суммарной мощностью 60 кВт и двумя литий-полимерными аккумуляторными батареями.

Одним из основных узлов электромобиля является тяговый электродвигатель.

К достоинствам тягового электродвигателя относятся:

- высокий коэффициент полезного действия: до 95%;
- высокий крутящий момент;
- компактность и малый вес;
- экологичность;
- возможность регулирования скорости вращения;
- способность функционировать в режиме генератора;

- возможность рекуперации электроэнергии при торможении.

Что касается недостатков тягового электродвигателя, то, по отзывам специалистов, их нет. Если в качестве тягового электродвигателя на автомобиль установить асинхронный электродвигатель, это позволит практически полностью исключить техническое обслуживание электродвигателя в течение определенного безопасного ресурса эксплуатации электромобиля.

Больше вопросов вызывает питание тягового электродвигателя, что тормозит широкое распространение подобных транспортных средств.

Сегодня высоковольтная аккумуляторная батарея в электромобиле остается уязвимым, дорогостоящим и относительно недолговечным, то есть самым проблемным элементом.

Масса высоковольтной аккумуляторной батареи превышает массу ДВС. Оптимальная рабочая температура, например литий-ионной батареи, находится в диапазоне +15...+35 °С, а при отрицательных температурах емкость такого источника питания падает, и ее нужно дополнительно подогревать, на что расходуется электроэнергия, сокращая запас хода электромобиля. Работа электромобиля в жестких климатических условиях (–50...+60 °С) становится весьма затруднительной.

На данный момент при создании электромобилей проблемными остаются следующие вопросы:

- доработка высоковольтной аккумуляторной батареи для получения запаса хода электромобиля до 500 км;

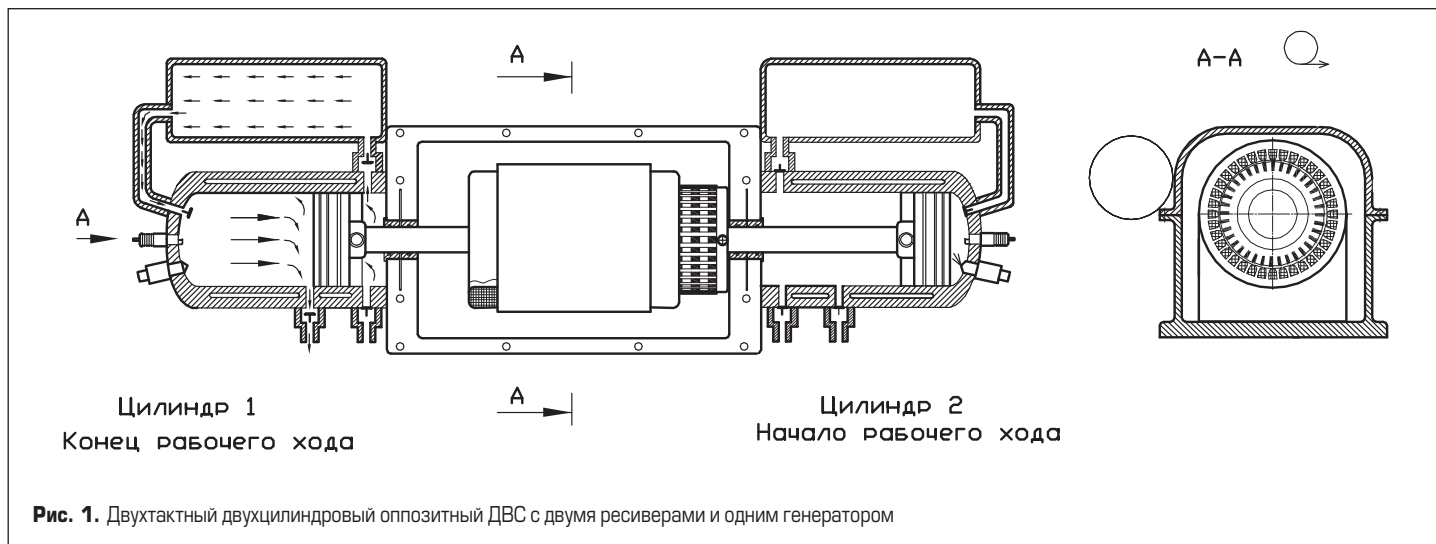


Рис. 1. Двухтактный двухцилиндровый оппозитный ДВС с двумя ресиверами и одним генератором

- существенное снижение цен на электромобили;
 - развитие разветвленной сети сервисных станций «быстрой зарядки» высоковольтных аккумуляторных батарей.
- Поэтому сегодня большей популярностью пользуются автомобили, оснащенные силовыми гибридными установками.

Силовые гибридные установки

Силовая гибридная установка состоит из ДВС, дополнительного тягового электродвигателя (мотор-генератора), который обычно размещают между ДВС и стандартной коробкой передач, и высоковольтной аккумуляторной батареи.

Японская компания Toyota Motor стала первой компанией, массово внедрившей на рынке гибридные технологии практически во всех сегментах модельного ряда — от малолитражек до седанов, кроссоверов и полноприводных внедорожников.

Для автомобиля Toyota Prius компания создала силовую гибридную установку Hybrid

Synergy Drive, состоящую из ДВС 2ZR-FXE, работающего по принципу Аткинсона, и электромотора мощностью 60 кВт (третье поколение ZVW30, 2009–2016 гг.). Автомобиль приводится в движение от ДВС, электромотора, а также может работать в синергетическом режиме. Автомобили, оснащенные силовыми гибридными установками, более экономичны, меньше выбрасывают вредных веществ в атмосферу, но сложны в изготовлении и значительно дороже автомобилей с традиционными ДВС.

Коэффициент полезного действия (КПД) (η) бензиновых четырехтактных ДВС находится в диапазоне 20–25%, а дизельных может достигать 40%.

Поэтому КПД силовой гибридной установки тоже невысокий.

$$\Sigma \eta = \eta_{\text{ДВС}} \times \eta_{\text{Г-М}}$$

$$\Sigma \eta = 0,25 \times 0,95 = 0,237$$

Разработана силовая гибридная установка с повышенным КПД и упрощенной конструкцией [1].

Силовая гибридная установка, состоящая из двухтактного оппозитного ДВС, содержит по меньшей мере два цилиндра с выполненными в них впускными, перепускными и продувочными клапанами, два поршня с поршневыми штоками, размещенных в цилиндрах и разделяющих цилиндры на надпоршневую рабочую камеру, имеющую совмещенную систему продувки отработанных газов и впуска свежей воздушной смеси, систему впрыска топлива, систему воспламенения рабочей смеси и выпуска отработанных газов, а также подпоршневую компрессорную камеру и ресивер, причем ресивер выполнен с возможностью соединения с подпоршневой компрессорной камерой и продувочным окном рабочей камеры. В корпусе силовой гибридной установки предусмотрен генератор, в статоре генератора размещен ротор (индуктор, соленоид), связанный с помощью поршневых штоков, через уплотнительные соединения и подшипники скольжения, с поршнями ДВС.

Действие силовой гибридной установки показано на рис. 1–4.

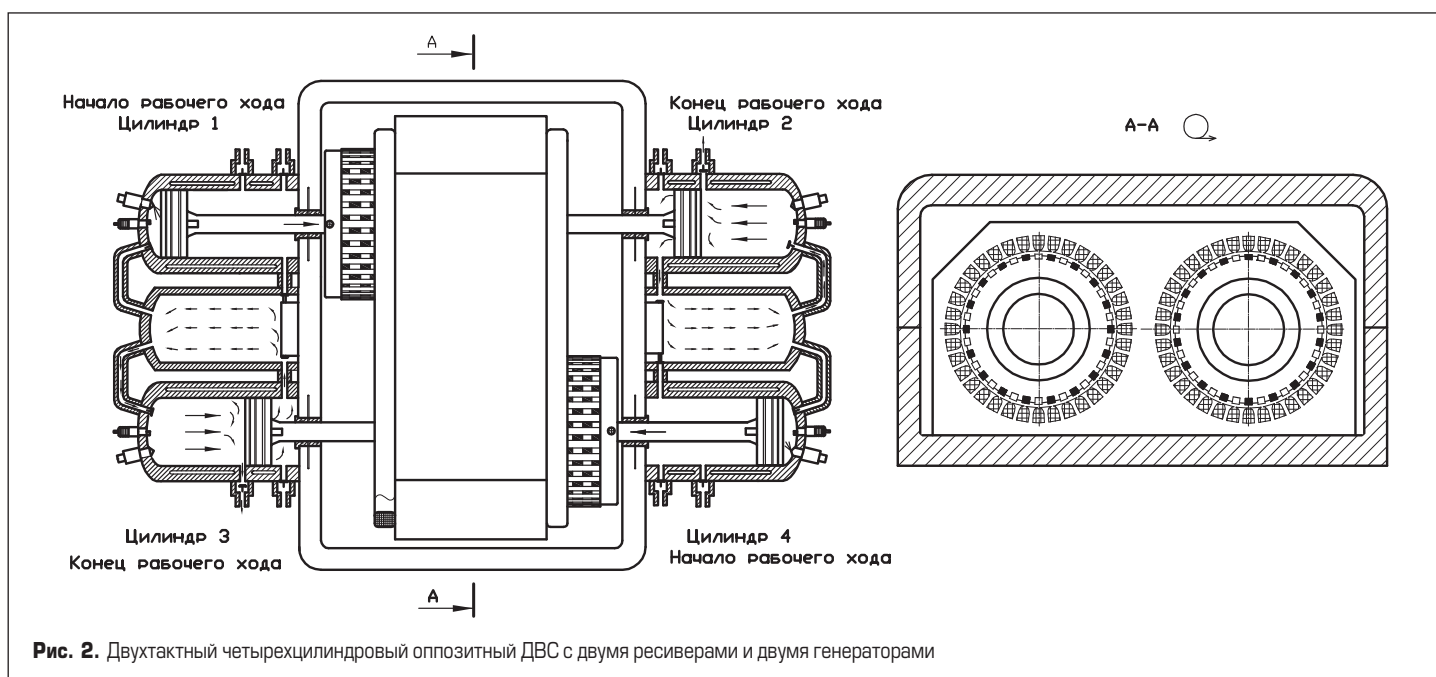


Рис. 2. Двухтактный четырехцилиндровый оппозитный ДВС с двумя ресиверами и двумя генераторами

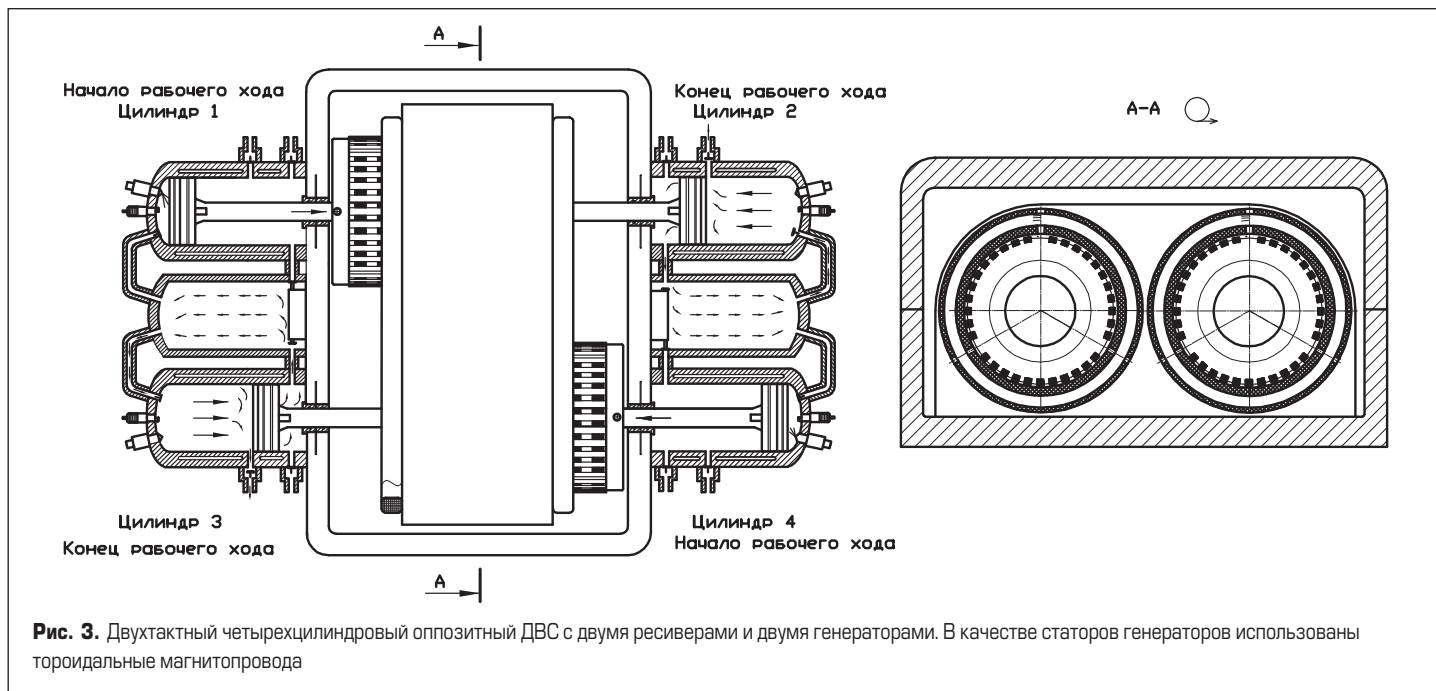


Рис. 3. Двухтактный четырехцилиндровый оппозитный ДВС с двумя ресиверами и двумя генераторами. В качестве статоров генераторов использованы тороидальные магнитопровода

При запуске силовой гибридной установки можно воспользоваться запасенной воздушной смесью из ресивера. Клапан цилиндра открывается, и за счет избыточного давления воздуха в ресивере и подачи импульса напряжения на якорную обмотку, например поршень в левом цилиндре, перемещается в нижнюю мертвую точку, передвигая шток с ротором в статоре генератора. Одновременно поршень в оппозитном (правом) цилиндре перемещается к верхней мертвой точке и создает разрежение в подпоршневой компрессорной камере. Под действием этого разрежения открывается впускной клапан, и свежая порция воздушной смеси засасывается в компрессорную камеру. При движении поршня к верхней мертвой точке перепускной, продувочный

и выпускной клапаны закрыты. Происходит сжатие рабочей смеси в цилиндре. Подается импульс тока, и топливная форсунка открывается. Топливо под давлением распыляется в рабочую камеру, в районе свечи зажигания. Подается импульс напряжения на свечу зажигания, между электродами свечи проскакивает искра, рабочая смесь воспламеняется, происходит сгорание и расширение рабочей смеси, давление в цилиндре повышается, и поршень перемещается к нижней мертвой точке, передвигая ротор в статоре. Выпускной и впускной клапаны закрыты, открывается перепускной клапан, и поршень выталкивает свежую воздушную смесь из компрессорной камеры в ресивер. В конце рабочего хода поршня открываются выпускной клапан

и клапан подачи свежей порции воздушной смеси из ресивера в рабочую камеру цилиндра. В результате осуществляется петлевая продувка рабочей камеры цилиндра. Отработанные газы из рабочей камеры поступают через выпускной клапан в глушитель и далее в атмосферу. Таким образом, происходят возвратно-поступательные движения поршней со штоками, на концах которых установлен ротор (индуктор, соленоид), также совершающий возвратно-поступательные движения в статоре генератора. Возбуждение ротора происходит от высокоэнергетических постоянных магнитов, установленных в пазах ротора (или на обмотку возбуждения ротора подают питание от источника постоянного тока). При возвратно-поступательном движении ротора

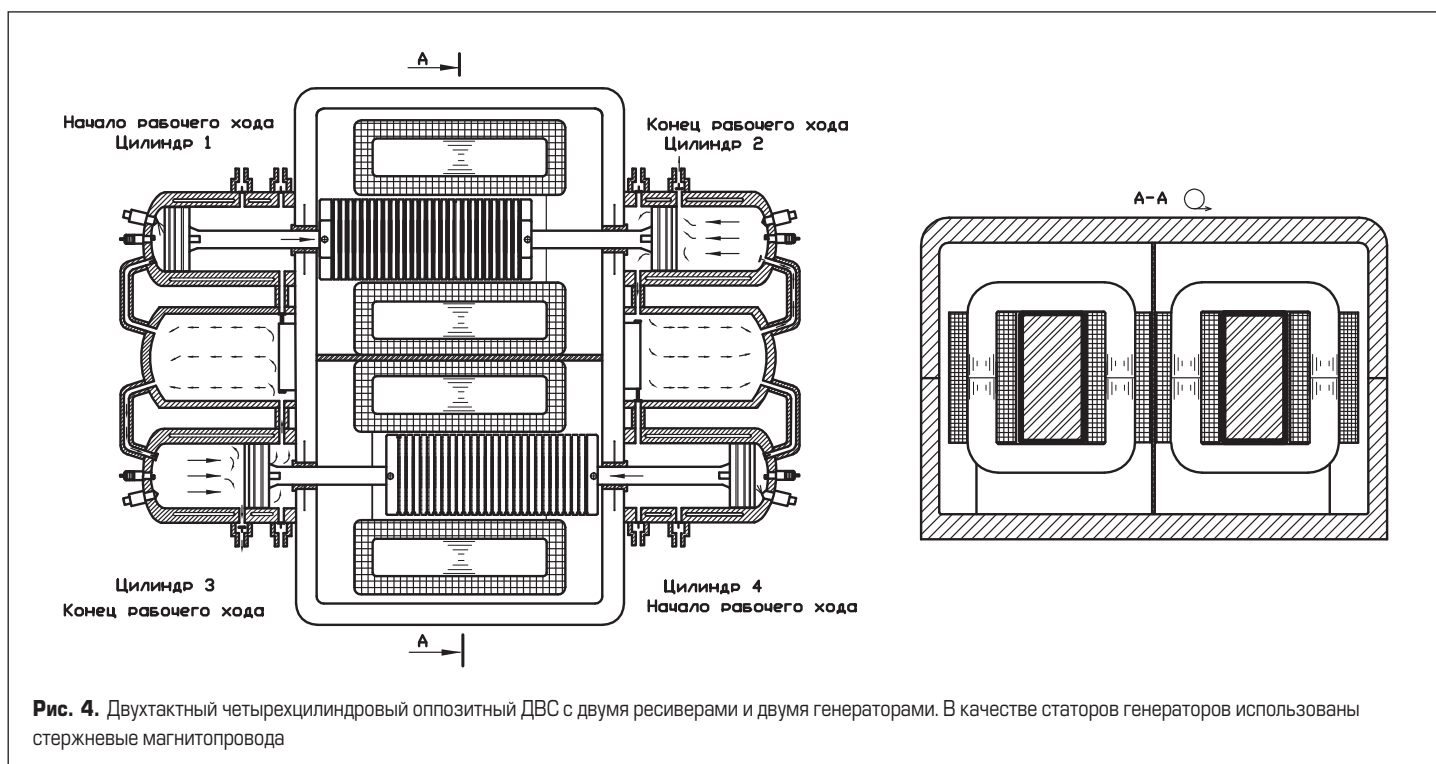


Рис. 4. Двухтактный четырехцилиндровый оппозитный ДВС с двумя ресиверами и двумя генераторами. В качестве статоров генераторов использованы стержневые магнитопровода

в статоре поток возбуждения пересекает проводники якорных обмоток статора и индуцирует в обмотках переменную электродвижущую силу (ЭДС) E , при подключении якорных обмоток к нагрузке проходящий по этим обмоткам ток (I) создает изменяющееся магнитное поле, результирующий магнитный поток (Φ) формируется совместным влиянием магнитодействующих сил: постоянных магнитов, установленных в пазах ротора (роторов), или обмотками возбуждения ротора (роторов) и изменяющимся магнитным полем якорных обмоток статора.

Технический результат заключается в повышении коэффициента полезного действия и упрощении конструкции силовой гибридной установки:

- за счет совмещения функций ДВС и генератора;
- за счет конструктивного объединения ДВС и генератора.

Силовая гибридная установка может работать:

- на бензиновом топливе, с непосредственным впрыском и искровой системой зажигания;
- в режиме воспламенения топливовоздушной смеси сжатием Spark Controlled Compression Ignition (SCCI) — есть предпосылки работы в данном режиме, который требует тщательной проработки;
- на дизельном топливе;
- на газовом топливе.

Работа силовой гибридной установки на бензиновом топливе, с непосредственным впрыском и искровой системой зажигания, а также на дизельном топливе происходит в обычном режиме.

Силовая гибридная установка может функционировать автономно в качестве передвижных и стационарных генераторных установок. Данными установками могут комплектоваться и автомобили, например четырехцилиндровым двухтактным оппозитным ДВС с двумя генераторами.

Бортовой компьютер, посредством инвертора (например, модель FS820R08A6P2B, рассчитанная на ток до 820 А, блокирующее напряжение 750 В, имеющая КПД до 98%, — совместная разработка компаний TDK и Infineon Technologies, удовлетворяющая требованиям, предъявляемым в области электротранспорта), преобразует постоянный ток высоковольтной аккумуляторной батареи (в частности, литий-ионной) в переменный трехфазный ток и питает тяговый электродвигатель автомобиля [6]. При уменьшении уровня заряда высоковольтной аккумуляторной батареи ниже установленного предела контроллер включает ДВС и отключает вход инвертора от высоковольтной аккумуляторной батареи, подсоединяя его к выпрямленному выходу генератора (группу обмоток статора соединяют, например, параллельно, с помощью выпрямителя получают выпрямленное напряжение с параметрами, согласованными для подключения входа инвертора), и тяговый электродвигатель получает питание от генератора. Электроэнергия, вырабатываемая другим генератором, по ко-

манде с контроллера через выпрямитель поступает на подзарядку высоковольтной аккумуляторной батареи. При полной зарядке высоковольтной аккумуляторной батареи контроллер отключает ее от выпрямителя и подключает ко входу инвертора, который питает тяговый электродвигатель автомобиля. Питание тягового электродвигателя может происходить непосредственно и от генератора, при соответствующем соединении якорных обмоток статора и согласовании его со входом тягового электродвигателя.

Зарядка высоковольтной аккумуляторной батареи может происходить и за счет энергии ДВС при незначительной нагрузке, а также за счет рекуперации энергии при торможении — в результате этих действий происходит экономия топлива и уменьшается выброс токсичных веществ в атмосферу.

КПД генератора зависит от его конструкции, толщины пакета статора, величины сопротивления обмоток, конструкции ротора, но главным образом от нагрузки и мощности генератора: чем генератор мощнее, тем выше его КПД, который может достигать 90–95%.

В предлагаемой силовой гибридной установке КПД составит 65–75% за счет конструктивного совмещения двухтактного оппозитного ДВС и генератора, так как ротор генератора является элементом соединения оппозитно расположенных между собой поршней.

Если сравнивать традиционную силовую гибридную установку, оснащенную четырехцилиндровым четырехтактным ДВС и тяговым электродвигателем, установленным между ДВС и стандартной коробкой переключения передач, с предлагаемой силовой гибридной установкой, то эффект достигается за счет уменьшения:

- механических потерь — попарно соединенные поршни обеспечивают строго возвратно-поступательное движение, благодаря этому отсутствуют боковые силы, действующие на стенки цилиндров со стороны поршней. Снижается трение и износ в цилиндропоршневой группе, упрощается конструкция поршня и самого двигателя. ДВС становится намного проще, технологичней (нет кривошипно-шатунного механизма, коробки переключения передач, зубчатых и ременных передач, подшипников качения и т. д.);
- тепловых потерь;
- металлоемкости;
- себестоимости;
- топливной эффективности, особенно в режиме воспламенения топливовоздушной смеси сжатием (SCCI), характеризующейся отсутствием открытого пламени и более низкой, чем у дизельных двигателей, температурой сгорания, в результате чего доля сгоревшего топлива возрастает до 95–97%.

Работа силовой гибридной установки в режиме воспламенения топливовоздушной смеси сжатием (SCCI) происходит с обедненной смесью.

В конце рабочего хода поршня открываются выпускной клапан и клапан подачи свежей порции воздушной смеси из ресивера

в рабочую камеру цилиндра. Свежая порция воздушной смеси смешивается с остатками горячих отработанных газов, которые разогревают воздушную смесь, облегчая ее перемешивание внутри рабочей камеры. При движении поршня к верхней мертвой точке происходит подача импульса тока и открытие топливной форсунки, и топливо под давлением распыляется в рабочую камеру, в результате чего в цилиндре образуется сбалансированная однородная топливовоздушная смесь с предельно низким содержанием топлива. Поршень сжимает топливовоздушную смесь в цилиндре до определенного объема, давление и температура в цилиндре повышаются до точки самовоспламенения, и смесь в цилиндре сгорает.

Силовая гибридная установка может иметь различное количество оппозитно расположенных поршней и, соответственно, генераторов. Генераторы могут быть постоянного и переменного тока, синхронные, асинхронные, индукторные и гистерезисные.

Преимуществом предлагаемой силовой гибридной установки является и автономная независимая работа поршневых пар ДВС, которые могут работать отдельно, в противофазе или синхронно, а также с разной частотой перемещения (например, два поршня работают на нагрузку, два поршня находятся в резерве), почти полное отсутствие вибрации во время эксплуатации. Такой эффект достигается за счет расположения поршней, которые уравнивают друг друга, что существенно увеличивает ресурс силовой гибридной установки, кроме того, они обеспечивают автомобилю низкий центр тяжести, что благоприятно скажется на устойчивости автомобиля.

Рассмотрены варианты, когда в генераторе в качестве статора используются стержневые и тороидальные магнитопроводы.

Высокоэнергетические постоянные магниты, установленные в пазах роторов (индукторов, соленоидов) генераторов, существенно повышают надежность работы генераторов благодаря отсутствию обмоток возбуждения и скользящих контактов для подвода к ним тока.

Возбуждение обмоток статора генератора (генераторов) происходит от постоянных магнитов, установленных в пазах ротора, при его возвратно-поступательном движении.

Литература

1. Заявка Российской Федерации (РФ) на изобретение № 2017130782.
2. Промышленные генераторы Vanguard. Каталог, 2015.
3. Передвижные генераторы Briggs & Stratton. Каталог, 2015.
4. Патент РФ на изобретение 2545109 «Двигатель внутреннего сгорания».
5. Брускин Д. Э., Зорохович А. Е., Хвостов В. С. Электрические машины. М.: Высшая школа, 1987.
6. Карташова Е., Гнеушев О. Инверторы для электротранспорта // Силовая электроника. 2017. № 4.