

МЕСТО ГИБРИДНОГО АВТОМОБИЛЯ В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ

Н. В. Савенков, к.т.н., доцент; О. О. Золотарев

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка

Аннотация. Проведен обзор предпосылок и практической необходимости создания автомобильного транспортного средства (АТС) с гибридной силовой установкой, нормативной базы, закрепляющей соответствующие понятия гибридного автомобиля и гибридной силовой установки, современных экологических стандартов и требований, предъявляемых к производимым автомобилям, перспектив и направлений их развития, классификации гибридных электромобилей, а также их основных конструктивных элементов. Выполнен анализ распространения гибридных и электрических автомобилей на рынках Европейского союза и России. Приведены преимущества и недостатки различных компоновочных схем силовой установки гибридного автомобиля, перспективных типов тяговых аккумуляторных батарей, электрических машин, а также их параметры и механические характеристики. В качестве наиболее перспективного типа источника механической мощности для применения на автомобильном транспорте рассматривается комбинация обратимой электрической машины и двигателя внутреннего сгорания.

Ключевые слова: гибридный автомобиль, парниковые газы, гибридная силовая установка, трансмиссия гибридного автомобиля, аккумуляторная батарея (АКБ), источник энергии, двигатель внутреннего сгорания, электрическая машина.



*Савенков
Никита Владимирович*



*Золотарев
Олег Олегович*

Для противодействия климатической угрозе на глобальном уровне в последние годы предпринимаются меры по сокращению эмиссий парниковых газов. Еще в 2015 г. было принято Парижское соглашение, нацеленное на удержание прироста глобальной средней температуры намного ниже 2°C сверх доиндустриальных уровней и приложение усилий в целях ограничения роста температуры до $1,5^{\circ}\text{C}$, признавая, что это значительно сократит риски и воздействия изменения климата, а также обеспечит повышение способности адаптации к последствиям изменения климата и переход на низкоуглеродное развитие с конечной целью достижения экономики с нулевым уровнем выбросов CO_2 и других парниковых газов в атмосферу к 2050 году [1]. По состоянию на май 2021 года 189 государств (в том числе и Россия) присоединились к соглашению. К настоящему времени уже более 60 ведущих стран мира заявили о стремлении к полной углеродной нейтральности (нулевым выбросам CO_2 в атмосферу) к 2050 году [2].

Кроме того, еще 18 октября 1968 правительством Германии принято положение о мерах против загрязнения воздуха, обуславливающих необходимость контроля выбросов автомобилей с двигателями, имеющими принудительное воспламенение, что в свою очередь привело к созданию коммюнике 20 марта 1970 года, подписанного представителями стран Европы «on the approximation of the laws of the Member States relating to measures to be taken against air pollution by gases from positive-ignition engines of motor vehicles» 70/220/ЕЕС. Этот документ положил начало стандартам «Евро» в автомобильном транспорте и ограничивал количество выбросов CO , CH , а также содержал ездовой цикл, согласно которому следовало проводить испытание транспортных средств с различной полной массой [3]. В дальнейшем, с течением времени, экологические требования к автомобилям и двигателям внутреннего сгорания ужесточались, соответственно менялись и экологические стандарты.

На сегодняшний день в ЕС действует положение комиссии ЕС 2016/646 от 20 апреля 2016 г., поправки, внесенные в Регламент (ЕС) № 692/2008 в отношении выбросов легких пассажирских и коммерческих автомобилей, представлены в таблице 1 (Евро 6). Данный документ регламентирует следующие параметры выбросов как у двигателей с принудительным воспламенением, так и у двигателей внутреннего сгорания (ДВС) с самовоспламенением: концентрация CO , NO_x , CH , а также удельное количество твердых взвешенных частиц [4].

Принятие следующего стандарта Euro 7 (предельные значения указаны в таблице 2) обсуждается, в том числе обговариваются и новые предельные значения выбросов, которые должны быть снижены.

Таблица 1.

**Предельные значения контролируемых параметров стандартом Euro 6d
для легкого пассажирского транспорта категории M₁.**

Стандарт	Дата введения в действие	CO (оксид углерода), г/км	THC (углеводороды), г/км	VOC (летучие органические химические вещества), г/км	NOx (оксид азота) г/км	NOx+HC, г/км	P (взвешенные частицы), г/км	PN, (взвешенные частицы) (ед./км)
Дизель								
Euro 6d	Январь 2021	0,50	–	–	0,080	0,170	0,0045	6×10 ¹¹
Бензин								
Euro 6d	Январь 2021	1,0	0,1	0,068	0,06	–	0,0045	6×10 ¹¹

Таблица 2.

**Предложенные предельные значения контролируемых параметров стандартом Euro 7
для легкого пассажирского транспорта категории M₁.**

Стандарт, этапы	CO (оксид углерода), г/км	THC (углеводороды), г/км	VOC (летучие органические химические вещества), г/км	NOx, (оксид азота) г/км	NOx+HC, г/км	P (взвешенные частицы), г/км	PN, (взвешенные частицы) (ед./км)	NH ₃ , г/км
Euro 7a	0,30	0,01	0,01	0,03	–	–	1×10 ¹¹	0,005
Euro 7b	0,10	0,005	0,005	0,01	–	–	6×10 ¹⁰	0,002

Однако предложения, выдвигаемые в группе (CLOVE, Consortium for ultra Low Vehicle Emissions), разрабатывающей нормативы, были приняты неоднозначно объединением европейских автопроизводителей (ACEA), так как такие стандарты не могут выполнить автомобили с ДВС [5].

Кроме вышеприведенного, представителями стран Европейского союза было подписано очередное коммюнике под названием «The European Green Deal» («Европейский зеленый курс»), которое также обозначает приоритетную цель на 2050 год по защите окружающей среды и человека от глобального потепления, загрязнения и выбросов, снижая их до нулевой отметки, повышая эффективность производства путем увеличения использования переработанного сырья [6].

Одним из главных источников загрязнения атмосферы и окружающей среды является автомобильный транспорт (АТ): от производства до эксплуатации. Доля загрязняющих веществ от автомобильного транспорта составила 99,0 % общего объема выбросов России в 2018 году [7].

С позиции экологии автотранспорт – это передвижной и периодически действующий источник загрязнения окружающей среды газообразными, жидкими и твердыми (сажей, гарью, копотью) химическими соединениями. Степень загрязнения определяется типом, мощностью, временем и режимом работы двигателя, качеством применяемого топлива, техническим состоянием двигателя, уровнем эксплуатации средства и т. д.

Путем обновления эксплуатируемого подвижного состава есть возможность сократить выбросы загряз-

няющих веществ и парниковых газов, в частности: ввести в пользование автомобили с гибридной либо электрической силовой установкой.

Электромобили и «гибридные» автомобили не следует относить к абсолютно экологически чистым транспортным средствам (ТС). Можно лишь говорить о более или менее высокой степени их экологической чистоты по сравнению с автомобилями, оснащенными ДВС, и об изменении характера и видов загрязнений воздушного бассейна (вывести загрязнение из областей с высокой плотностью населения).

С греческого языка «гибрид» переводится как помесь, а именно – объект, сочетающий в себе признаки двух и более предметов. Если же рассматривать гибридные автомобили, то это такие автомобили, которые сочетают в себе несколько видов тяговых двигателей (например, электрический двигатель и ДВС).

Согласно ECE/TRANS/WP.29/2014/84, «гибридное транспортное средство» (ГТС) означает транспортное средство с силовым агрегатом, использующим по меньшей мере два различных типа преобразователей энергии и два различных типа энергоаккумулирующих систем; «гибридный электромобиль» (ГЭ) означает гибридное транспортное средство с силовым агрегатом, использующим электромашину(ы) в качестве преобразователя(ей) энергии.

Также вышеприведенные правила были взяты за основу для формирования регламента безопасности колесных транспортных средств технического регламента таможенного союза (ТРТС). В свою очередь

в ТРТС 018/2011 встречаются следующие определения «гибридного» автомобиля:

– «гибридное транспортное средство» – транспортное средство, имеющее не менее двух различных преобразователей энергии (двигателей) и двух различных (бортовых) систем аккумулирования энергии для целей приведения в движение транспортного средства;

– «энергетическая установка гибридного транспортного средства» – совокупность двигателя внутреннего сгорания, электродвигателя, генератора (функции двигателя и генератора могут выполняться одной электромашинной), устройства аккумулирования энергии, электропреобразователей и системы управления.

Главное достоинство «гибридных» автомобилей заключается в возможности движения как на электротяге, так и с помощью ДВС, включая их совместное использование. К примеру, для передвижения в городских условиях на относительно небольшие расстояния более рационально использовать электроэнергию, запасенную в аккумуляторной батарее. При длительном движении либо в случае режимов с повышенной развиваемой мощностью на ведущих колесах (например, интенсивный разгон) эксплуатация предпочтительнее с применением механической энергии ДВС.

Автомобили с электрической силовой установкой становятся более востребованными, однако, до настоящего времени не решена проблема с относительно высокой стоимостью аккумуляторных ячеек, переносящих электрический заряд. В связи с этим, общая цена электрического автомобиля с возможностью движения на дальние расстояния (с большей емкостью АКБ) выше аналогичного автомобиля с ДВС. С целью снижения стоимости подвижного состава и увеличения запаса хода без дополнительной зарядки возможно применение гибридной силовой установки.

Автомобили, оснащенные гибридными силовыми установками, появились на рынке относительно недавно, и за это время был образован соответствующий отдельный сегмент рынка, статистика продаж в котором с каждым годом только увеличивается. Отдельные компании, такие как Bentley, Cadillac, Ford, Jaguar, Lotus Cars, Mini, Volkswagen, Volvo Cars, декларируют уменьшение производства автомобилей с ДВС либо полную электрификацию модельного ряда [8,9]. Резкий переход от двигателей внутреннего сгорания к полностью электрическим автомобилям невозможен из-за необходимости организации широкой и надежной инфраструктуры зарядных станций. Таким образом, именно автомобили с гибридной силовой установкой в ближайшее время должны заместить автомобили с ДВС и в дальнейшем, с учетом государственной политики декарбонизации промышленности и транспорта, они будут заменены полноценными электромобилями [7,10].

Согласно данным The European Automobile Manufacturers' Association (ACEA), из 80,3 млн. зарегистрированных транспортных средств в ЕС в 2020 году 10,5 % приходится на электрически заряжаемые автомобили [11].

В 2020 году в мире было продано 3 млн. 240 тысяч электромобилей и подключаемых гибридов. Это на 43 % больше, чем в 2019 году. При этом мировые продажи

автомобилей с классическим ДВС сократились на 14 %, из-за чего доля электромобилей увеличилась с 2,5 % в 2019 году до 4,2 % в 2020-м. В Европе в 2020 году было продано 1 млн. 395 тысяч электромобилей и подключаемых гибридов (+137 % к 2019 году), а их доля показала рост с 3,3 % до 10,2 %. Для сравнения, в Китае рынок электромобилей увеличился на 12 % до 1 млн. 337 тысяч экземпляров, а в США – на 4 % до 328 тысяч единиц. На Европу, Китай и США приходится около 95 % мировых продаж автомобилей на электротяге [12].

По итогам первого полугодия 2021 года мировые продажи электромобилей увеличились на 168 % и составили 2 млн. 650 тысяч единиц. По прогнозу EV-volumes (электронная база данных о продажах электромобилей), всего в 2021 году в мире будет реализовано 6,4 млн. электромобилей, что на 98 % больше по сравнению с прошлым годом [13]. При этом продажи аккумуляторных автомобилей достигнут 4 млн. единиц, а заряжаемых гибридов – 2 млн. 400 тысяч машин. Таким образом, мировой парк «зеленых» автомобилей к концу 2021 года должен составить более 16 млн. единиц, две трети из которых будут полноценные электромобили, остальные – гибриды [12,13].

Кроме вышесказанного, за последние 7 лет количество моделей новых легковых и легких коммерческих автомобилей, официально продаваемых в России, уменьшилось почти втрое (- 32 %). А в сегменте электромобилей – ситуация прямо противоположная. Семь лет назад в РФ на первичном рынке продавалось всего 6 моделей легковых автомобилей и легких коммерческих транспортных средств (ТС) на электротяге, в 2021 году – уже 16, а на 2022 год, судя по информации автопроизводителей, соответствующее предложение увеличится еще как минимум на 10 моделей [14].

По состоянию на 1 января 2020 года парк автомобильной техники на территории Российской Федерации составил 52,9 млн. единиц. 84 % от этого количества приходится на легковые автомобили, что соответствует 44,5 млн. экземпляров. Парк легкой коммерческой техники составляет порядка 4,2 млн. ТС, что практически соответствует доле в 8 %. Грузовых автомобилей в стране зарегистрировано 3,8 млн. единиц (доля – более 7 %). Около 1 % российского парка занимают автобусы, которых в России насчитывается немногим более 0,4 млн. единиц [15].

Рынок электромобилей в России (как первичный, так и вторичный) на протяжении последних нескольких лет характеризуется ростом. Так, в 2020 году в целом реализовано 5 274 подержанных и 687 новых электромобилей, что на 60 % и 95 % соответственно превышает показатели 2019 года. А в первом квартале 2021 года в РФ реализовано 1 273 подержанных и 307 новых автомобилей на электротяге. Это на 46 % и почти в 6 раз больше, чем в январе-марте 2020 года. Рынок электромобилей стал расти активнее с середины 2020 года. При этом рост продаж подержанных ТС связан с отменой таможенных пошлин на электромобили при их ввозе на территорию ЕАЭС (вступило в силу 4 мая 2020 года), а рост продаж новых – с появлением новых моделей, таких как Audi e-tron и Porsche Taycan. Если ориентироваться на статистику 1-го квартала, то на российском рынке насчитывается уже 14 моделей новых электромобилей, реализуемых в РФ. Так, Porsche

Тауран был приобретен в количестве 135 экземпляров, Audi e-Tron – 62 единицы, а вместе они составили более 60 % рынка. На вторичном рынке в модельном рейтинге значительную долю (85 %) традиционно занимает Nissan Leaf, импортируемый из Японии. В 2020 году на 1 новый электромобиль в России приходилось почти 8 с пробегом. По итогам первого квартала 2021 года это соотношение фактически составило 1 к 4 [16].

Проектирование любой сложной системы, включая гибридные силовые установки, является комплексным, многоцелевым процессом и требует широкой выборки исследований с разными входными параметрами, в разных условиях. Это позволяет достичь наиболее эффективного результата в заданных технических условиях.

Силовая установка, создающая тяговое усилие на ведущих колесах, в автомобиле с гибридным приводом, зачастую, имеет следующие электромеханические компоненты: двигатель внутреннего сгорания; электрический двигатель; электрический генератор (возможно использование электромашины двойного действия); трансмиссия, которая передает мощность от различных источников механической энергии на колеса автомобиля; главная передача; дифференциал; источник энергии для ДВС; тяговая АКБ, зачастую высоковольтная; резервный источник питания, чаще всего используются широко применяемые АКБ с напряжением 12 В; блоки управления ДВС и электрическими машинами; модуль заряда аккумуляторной батареи от внешнего источника питания; модуль контроля заряда аккумуляторной батареи.

Соответственно, для наиболее рационального использования ресурсов, которыми располагает инженер, необходимо провести анализ как элементов проектирования, так и вариаций их комбинирования в тех или иных последовательностях в трансмиссии автомобиля. В зависимости от наличия тех или иных элементов, возможно уточнять сценарии использования транспортного средства и его себестоимость производства.

Схема трансмиссии «гибридного» АТС является расширением традиционной конструкции электромотоцикла и автомобиля с ДВС. Ниже приведены три наиболее часто встречающиеся варианта компоновки: последовательная, параллельная, последовательно-параллельная [17].

Согласно ECE/TRANS/WP.29/2014/84, к «параллельным гибридным автомобилям» относят ГТС, не являющиеся последовательным гибридным автомобилем; к нему относятся гибридные транспортные средства с разветвлением потоков мощности, а также со смешанным параллельно-последовательным соединением; в свою очередь к «последовательным гибридным автомобилям» относят гибридное транспортное средство, в котором мощность, подаваемая на ведущие колеса, обеспечивается исключительно за счет преобразователей энергии, а не двигателя внутреннего сгорания. Таким образом, можно утверждать, что последовательная схема гибридного автомобиля может быть применена только в ГЭ.

На рис. 1 приведены распространенные схемы ГТС и ГЭ; условные обозначения: ВВБ – высоковольтная батарея; МЭ – машина электрическая (мотор

электрический либо стартер-генератор); ГЭ – генератор электрический, КПП – коробка перемены передач; ПП – передача планетарная.

В ГТС дифференциальное устройство (или разделитель мощностного потока) представлен в виде планетарного редуктора или их комбинаций, передающих и преобразующих крутящий момент из нескольких источников механической энергии.

В современных гибридных автомобилях с относительно большой емкостью тяговой батареи успешно применяются как последовательная схема включения источников крутящего момента, так и параллельная. Поскольку тяговый электрический двигатель может быть единственным источником механической мощности, он должен обладать требуемой механической характеристикой, чтобы обеспечивать необходимые тягово-скоростные свойства автомобиля в заданных эксплуатационных условиях. В случае использования последовательно-параллельной схемы применяют планетарный редуктор (Toyota Prius, Ford Escape, Chevrolet Volt), в котором связаны ДВС и электромашины. Кроме того, при последовательно-параллельной схеме максимальная скорость и тяговое усилие определяются, в частности, параметрами электрической машины.

Хотя все конструкции автомобилей с комбинированной силовой установкой обуславливают повышение эффективности и снижение выбросов, по сравнению с обычными автомобилями, имеют место различия в их воздействии на окружающую среду. У машин с последовательной трансмиссией, в случае использования ДВС в качестве основного источника механической энергии, увеличены потери из-за дополнительного преобразование энергии (механической в электрическую и наоборот), что уменьшает общую эффективность, по сравнению с сопоставимыми параллельными или последовательно-параллельными системами [17]. Последовательные гибриды обладают преимуществом постоянно поддерживать режим работы ДВС в оптимальном нагрузочно-скоростном диапазоне, что приводит к уменьшению выбросов. Автомобили с тяговой силовой установкой последовательного типа также могут питаться от батареи, которая превращает автомобиль в ТС с нулевым уровнем выбросов.

Параллельная и последовательно-параллельные системы также снижают негативное влияние ДВС на экологию и позволяют достичь таких же результатов, как и с последовательной системой. Кроме того, они имеют преимущество в части использования мощности ДВС без дополнительных потерь в электрической трансмиссии, но ее конструкция несколько усложняется. В рамках сравнения между параллельной схемой и последовательно-параллельной схемой, последняя дает больший контроль над режимом работы силовой установки, так как ДВС и электромашина связаны дифференциальной связью в планетарном редукторе [17].

По типу использования сокращающих расход топлива технологий можно выделить следующие категории ТС:

1. Микрогибрид – базовая ступень. Примером является система BMW Efficient Dynamics. Ключевой компонент подобной силовой установки – генератор с электронным управлением. Он отключается на разгонах, минимизируя нагрузку на ДВС, а нужную

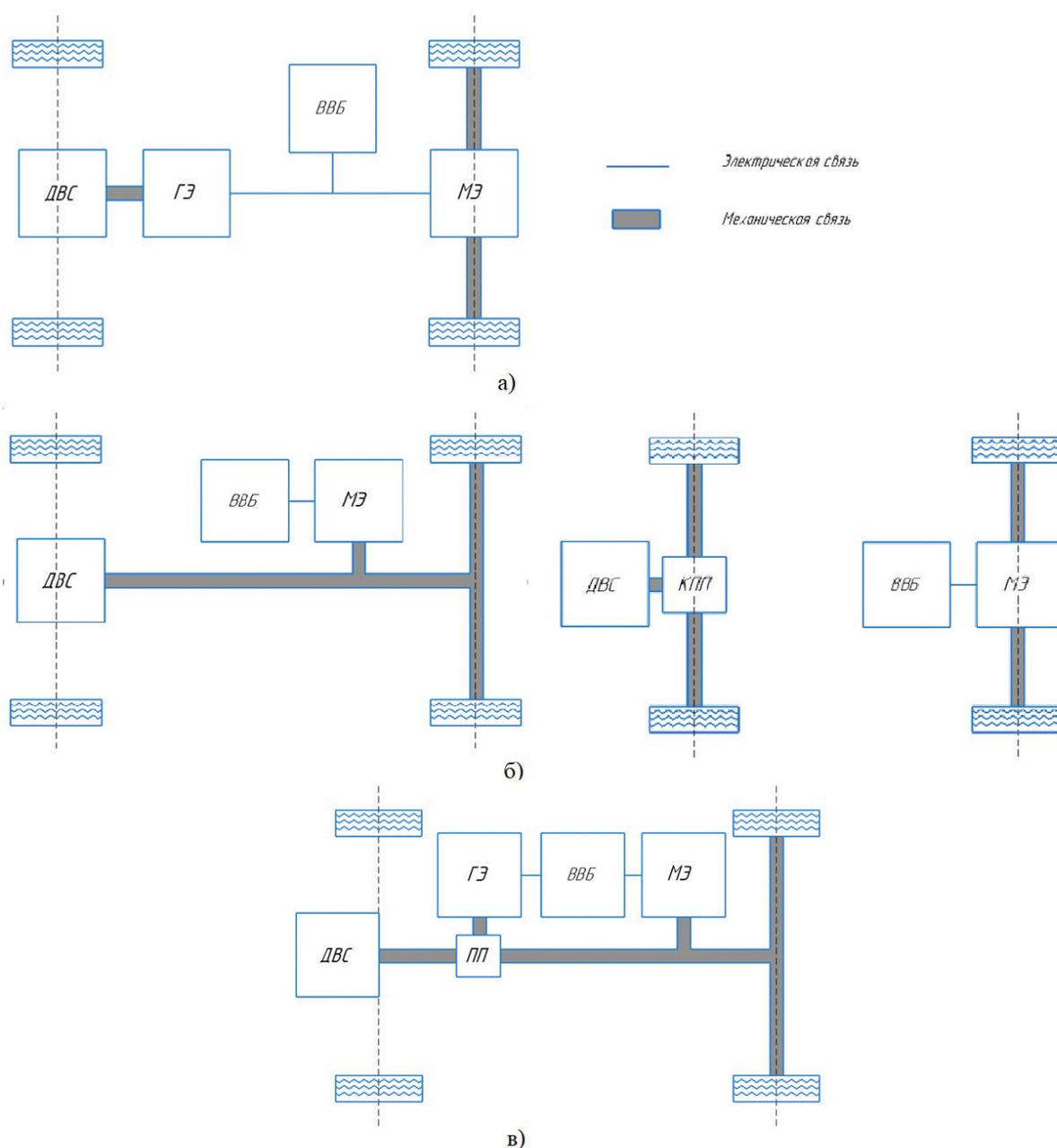


Рис. 1. Схемы автомобильных гибридных силовых установок:

а) последовательная; б) параллельная; в) последовательно-параллельная схема

другим агрегатам машины электроэнергию старается вырабатывать только при замедлении хода. Система достаточно простая, ею возможно оснастить любой современный автомобиль. Также к микрогибридным технологиям возможно отнести систему «старт-стоп», которая автоматически отключает ДВС при остановках автомобиля, дополнительно снижая расход топлива и выбросы в атмосферу [17].

2. Умеренный гибрид – электрическая машина, работающая совместно с ДВС, улучшает тягово-скоростные свойства автомобиля, и позволяет использовать первичный источник крутящего момента в оптимальном диапазоне нагрузочно-скоростных режимов. Таким образом, достигается экономичность работы силовой установки. Но двигаться только на электротяге такая машина ещё не может. Основа умеренного гибрида – электромотор двойного действия

мощностью до 15 кВт, соединённый с ДВС. Данная электрическая машина, фактически, является стартер-генератором и может заменить оба эти узла, попутно с ее помощью также реализуется система «старт-стоп». В производстве умеренный гибрид относительно других видов «гибридов» достаточно экономичен, так как дополнительные расходы на электрическую машину двойного действия компенсируются отсутствием традиционного стартера и генератора на автомобиле при сохранении типового ДВС. Такой тип конструкции не требует значительных изменений существующих производственных линий. Поскольку размер электродвигателя в «умеренном» гибриде меньше, чем в полном, он не может использоваться так широко в течение всего цикла движения. Общая экономия топливных ресурсов может составлять в пределах 10–15 % по сравнению с негибридной силовой установкой [17].

3. Полный гибрид – категория, позволяющая преодолеть некоторое расстояние только на электрической тяге. Полные гибриды значительно сложнее по конструкции, чем «умеренные» и «микро». Вал электрической машины соединён с ДВС не постоянно – между ними установлено сцепление или муфта. При этом ГТС может двигаться с неработающим двигателем и эффективнее накапливать электроэнергию при торможениях. Кроме того, в таких автомобилях габаритные размеры как электромашин, так и системы хранения электрического заряда значительно больше. При конструировании таких ТС должен соблюдаться баланс между

характеристиками ДВС и электрического тягового привода для обеспечения оптимальных режимов работы силовой установки в заданных режимах движения ТС.

Таким образом, можно сделать вывод, что для движения в городских условиях с частыми остановками и ускорениями более предпочтительным будет выбор в сторону более развитой электрической части. В случае же применения автомобиля в загородном цикле движения стоит сместить мощностной баланс силовой установки в сторону ДВС, в таблице 3 приведены основные характеристики ряда производимых гибридных автомобилей [17].

Таблица 3.

Основные параметры гибридных автомобилей

Модель	Toyota Prius NHW10	Toyota Prius NHW20	Toyota Prius ZVW35	Toyota Prius ZVW50	Chevrolet Volt I	Chevrolet Volt II	Ford c-Max Hybrid	BMW i3 REX	Honda Jazz hybrid
Годы производства	1997–2001	2003–2009	2012–2016	2015–наст. время	2011–2015	2015–наст. время	2013–наст. время	2013–2016	2010–2012
Рабочий объем ДВС, см ³	1497	1497	1794	1794	1398	1490	2000	647	1399
Мощность ДВС, кВт/(об/мин)	43/4000	55/5000	73/5200	72/5200	63/4800	75/–	104	28/–	65/5800
Крутящий момент ДВС Нм/(об/мин)	102/4000	111/4200	142/4000	142/3600	130/4300	140/4300	141/–	55/4300	121/4500
Объем топливного бака, л	45	45	45	43	35	33	52	–	–
Расход топлива, смешанный цикл, л/100км	4,5	4,3	2,1	1,2	–	2	2,4	0,6	4,5
К-во электрических машин	2	2	2	2	2	2	2	2	1
Мощность электродвигателей кВт/(об/мин)	30/–	50/1200	82/–	50	111/–	111/–	35/–	125	10
Крутящий момент электромотора Нм/(об/мин)	–	–	207/–	163/–	370/–	398/–	240/–	250/–	78/–
Тип батареи	Ni–MH	Ni–MH	Ni–MH	Li–ion	Li–ion	Li–ion	Li–ion	Li–ion	Ni–MH
Емкость тяговой АКБ, кВт/ч	1,8	1,3	4,4	8,8	16	18,4	7,6	33,2	0,65
Рабочее напряжение батареи, В	340	200	200	207	355	355	300	360	100
Запас хода на аккумуляторе, км	–	–	20	36	55	85	30	200	–
Возможность подзарядки	–	–	есть	есть	есть	есть	есть	есть	нет
Тип гибридной установки	Последовательно-параллельный	Последовательная	Параллельная						

«–» данные в профильной литературе не приведены

По типу заряда батареи различают следующие виды автомобилей с гибридной установкой:

1) с возможностью подключения к внешнему источнику питания – перезаряжаемая энергоаккумулирующая система (ПЭАС) – означает систему, которая обеспечивает подачу энергии (помимо энергии топлива) для создания тяги в первичном виде; ПЭАС может включать вспомогательные системы для регулирования температурного режима и электронного управления, хранения электрической, гидравлической, пневматической или механической энергии;

2) без возможности подключения к внешнему источнику питания – энергоаккумулирующая система может хранить электрическую, гидравлическую, пневматическую или механическую энергию, а также способна автономно преобразовывать эти виды энергии без ее непосредственного использования для це-

лей приведения транспортного средства в движение, и которая может быть повторно заправлена или перезаряжена с помощью внутреннего устройства.

Автомобили, использующие электрическую батарею в качестве основного источника энергии движущей силы, рассматриваются в качестве перспективных за счет снижения либо полного отсутствия выбросов вредных веществ и парниковых газов в процессе движения. Однако общая эффективность процессов производства и эксплуатации данных ТС кроме всего прочего обусловлена стоимостью энергетических элементов, их удельной емкостью, а также показателями процессов их производства и утилизации.

Сама батарея состоит из множества элементов, объединенных в модули, которые в свою очередь группируются в пакеты. Это можно сделать различными способами, используя последовательные

и параллельные соединения между группами ячеек и/или модулей. Электрические двигатели обычно работают при напряжении в несколько сотен вольт (минимум около 100 вольт). Соответственно 100 литий-ионных аккумуляторов с напряжением одного элемента 3,6 В позволяют получить 360 В, если они расположены последовательно. Однако некоторые автомобили имеют гораздо больше элементов с меньшим напряжением, сконфигурированных в сложные массивы с параллельным и последовательным соединением. Также, в дополнение к основному блоку батарей используется «балансир» – элемент терморегулирования и контроля напряжения. Он необходим для предотвращения перезарядки и обнаружения неисправностей батареи на ранних стадиях, предупреждая преждевременную деградацию.

Тяговая АКБ обычно является самым большим и самым дорогим компонентом как электрического автомобиля, так и гибридного. Кроме того, к ним предъявляются различные требования, такие как необходимая электрическая ёмкость, возможность быстрого заряда и передачи больших значений токов. Таким образом, на автомобилях должно обеспечиваться применение наилучшей из возможных комбинации как в области химического состава АКБ, так и её конструктивных особенностей, в том числе компоновочных решений ячеек, линий питания и охлаждения.

Исходя из сравнительного анализа аккумуляторных батарей, литий-ионная батарея рассматривается в качестве наиболее перспективного типа АКБ для ГТС [18]. В таблице 4 приведена сравнительная характеристика батарей различных типов [18].

Таблица 4.

Сравнительная характеристика тяговых АКБ

Вид батареи	Удельная емкость, Вт·ч/кг	Пиковая мощность, Вт/кг	Энергетическая эффективность, %	К-во циклов заряда-разряда	Саморазряд, % за 48 ч.	Стоимость USD/кВт·ч, значения приведены на 2008 г.
Кислотно-водный раствор						
Свинцово-кислотные	35-50	150-400	>80	500-1000	0,6	120-150
Щелочно-водный раствор						
Никель-кадмиевые	50-60	80-150	75	800	1	250-350
Никель-металлические	50-60	80-150	75	1500-2000	3	200-400
Никель-цинковые	55-75	170-260	65	300	1,6	10-300
Никель-металл-гидридные	70-95	200-300	70	750-1200+	6	200-350
Алюминий-воздушные	200-300	160	<50	–	–	–
Металл-воздушные	80-120	90	60	500+	–	50
Цинк-воздушные	100-220	30-80	60	600+	–	90-120
Проточные						
Цинк-вроминовые	70-85	90-110	65-70	500-2000	–	200-250
Окислительно-восстановленный ванадий	20-30	110	75-85	–	–	400-450
Расплавленная соль						
Сода-серные	150-240	230	80	800+	0*	250-450
Сода-хлоридникелевые	90-120	130-160	80	1200+	0*	230-345
Литий-металл-сернистые	100-130	150-250	80	1000+	-	110
Органически-литиевые						
Литий-ионные	80-130	200-300	>95	1000+	0,7	200
–» данные в профильной литературе не приведены; * без саморазряда, но с потерей заряда на охлаждение						

Кроме того, важным показателем АКБ является удельная емкость и мощность. Сравнительный анализ характеристик приведен на рис. 2 [19].

Дополнительно к рассмотренным характеристикам, необходимо отметить, что цена на аккумуляторные ячейки и пакеты ежегодно снижается, в свою очередь этот спрос формирует стабильную потребность на сырьевую базу, из которой производятся АКБ, что в свою очередь в дальнейшем может увеличить стоимость батареи. На сегодняшний день представлена соответствующая статистика по стоимости батарей

(рис. 3), а также по стоимости самого электромобиля (рис. 4) [19,20].

Электрическая машина является основным элементом электропривода. Ниже выполнено сравнение характеристик внешних коммутируемых электродвигателей в ракурсе их применения в качестве тяговых электродвигателей в транспортных средствах:

1) асинхронные двигатели (обратимый, необходима подача реактивного тока), высокий пусковой момент, самозапуск, простота конструкции, регулируется изменением частоты, переключением фаз, скольже-

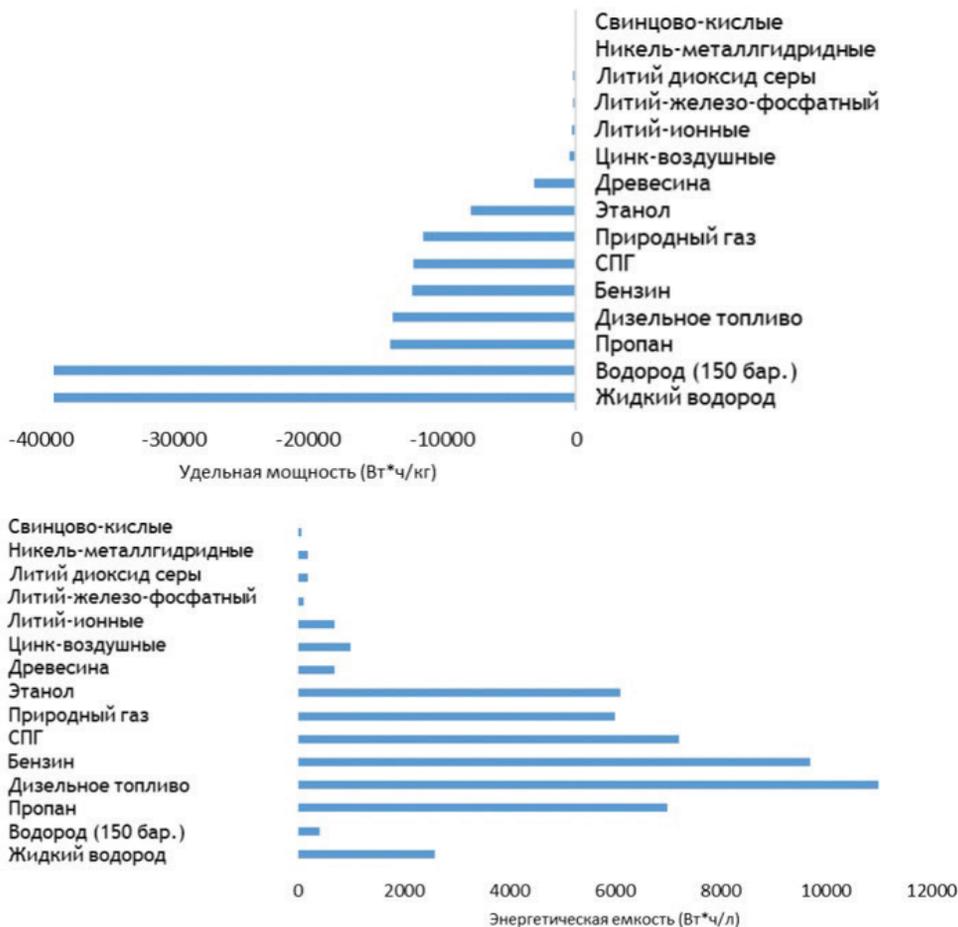


Рис. 2. Удельные мощности и энергетические емкости аккумуляторов в сравнении с другими видами топлив



Рис. 3. Средневзвешенная стоимость (USD/кВт*ч) батарейной ячейки, их упаковки в соответствующие года производства

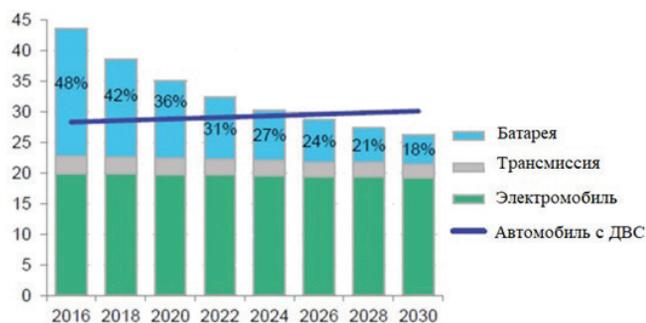


Рис. 4. Структура цены электромобиля на фоне цены автомобиля (цены в тыс. USD без налогов, США, средний ценовой сегмент)

ние (отставание магнитного поля ротора от статора): с короткозамкнутым ротором (АДКР); двойная клетка; глубокий паз; со скользящим контактом;

2) синхронные двигатели: со скользящим контактом; со скользящим контактом и внешним подвозбудителем (СДОВ – синхронный двигатель с обмоткой возбуждения); бесщеточные с использованием постоянных магнитов; СДППП – синхронный двигатель с поверхностной установкой постоянных магнитов; СДПМВ – синхронный двигатель со встроенными постоянными магнитами;

3) комбинированные (основная работа происходит в синхронном магнитном поле, а запуск происходит с помощью демпферной обмотки на статоре,

запуск синхронного двигателя асинхронным способом);

4) двигатели с переменным магнитным сопротивлением, либо аналогичное название гибридные шаговые двигатели – аналог комбинированных двигателей с векторным электронным управлением магнитным полем статора с помощью регулируемого инвертора (СРД-ПМ – синхронный реактивный двигатель с постоянными магнитами, синхронный гибридный двигатель, двигатели с переменным магнитным сопротивлением).

Ниже на рис. 5 представлены сравнительные характеристики внешне коммутируемых электродвигателей, в ракурсе применения в качестве тяговых электродвигателей в транспортных средствах [21].

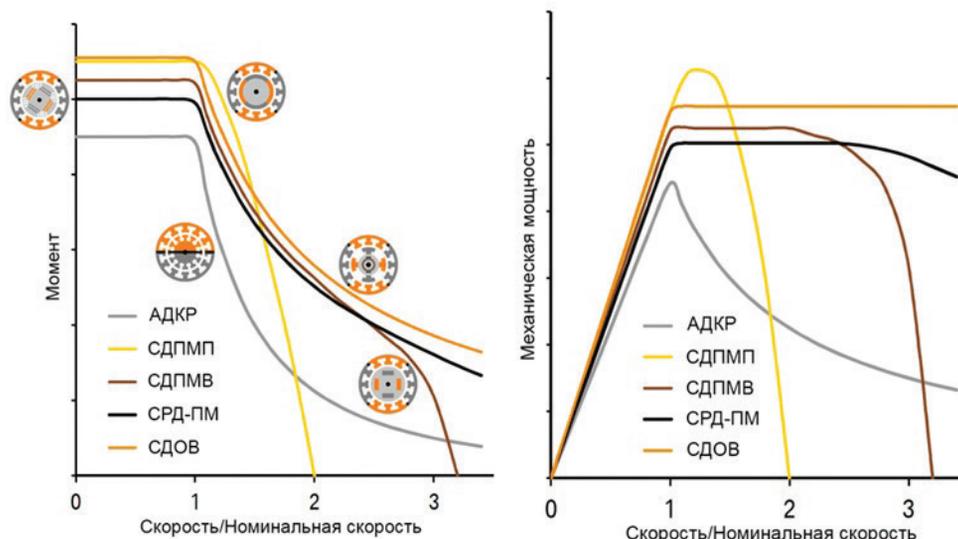


Рис. 5. Сравнение механических характеристик электродвигателей разных типов при ограниченном токе статора

В таблице 3 указаны условные сравнительные значения в условных баллах от 1 до 3, которые назначены

автопроизводителями [23], где 1 – высокий показатель, 2 – средний показатель, а 3 – низкий показатель.

Таблица 3.

Сравнение эксплуатационных характеристик электродвигателей разных типов

Параметр	АДКР	СДПМП	СДПМВ	СРД-ПМ	СДОВ
Постоянство мощности во всем диапазоне скоростей	2	3	2	1	1
Момент к току статора	2	1	1	1	1
Эффективность (КПД) во всем рабочем диапазоне	2	2	2	1	1
Вес	2	1	1	1	2

Исходя из вышеприведенных примеров, оправданно сделать вывод о наибольшей перспективности синхронного реактивного двигателя с постоянными магнитами (синхронный гибридный двигатель, двигатель с переменным магнитным сопротивлением) по причине рационального соотношения эксплуатационных и механических характеристик.

ВЫВОД

В статье выполнен обзор статистики применения гибридных транспортных средств и электромобилей в современном автотранспорте, а также приведена нормативная база, регламентирующая соответствующие определения, выполнено сравнение различных конструкций гибридного автомобиля, типов аккумуляторных батарей и электрических машин, рассмотрены их электрические, механические и эксплуатационных параметры.

Направление дальнейших исследований заключается в разработке математической модели рабочего процесса силовой установки гибридного автомобиля на основе нагрузочно-скоростных и механических характеристик их двигателей, определенных в различных условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Парижское соглашение. [Электронный ресурс]/ ООН. – Париж. 12.12.2015. – 32 С. Режим доступа: https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf.
2. Грушевенко, Е. В. Моделирование сценариев декорбонизации и адаптации: роль в принятии политических и экономических решений [Электронный ресурс]/ Е. В Грушевенко/SKOLKOVO Moscow School of Management. – Москва. 2021 – май. – 52 С., – Режим доступа: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_RU_Modeling.pdf.
3. 70/220/EEC COUNCIL DIRECTIVE on the approximation of the laws of the Member States relating to measures to be taken against air pollution by gases from positive-ignition engines of motor vehicles. [Электронный ресурс]/ Official Journal of the European Communities. – Strasbourg, 20.03.1970. -21 P., – Режим доступа: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:31970L0220&from=EN>.
4. REGULATIONS COMMISSION REGULATION (EU) 2016/646 amending Regulation (EC) No 692/2008 as regards emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 6) [Электронный ресурс]/ Official Journal of the European Communities. – Strasbourg, 20.04.2016. – 22 P., – Режим доступа: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016R0646&from=EN>.
5. ACEA Position PaperViews on proposals forEuro 7 emission standard [Электронный ресурс]/ ACEA. – Brussels. December 2020. – 19 P., Режим доступа: https://www.acea.auto/files/ACEA_Position_Paper-Views_on_proposals_for_Euro_7_emission_standard.pdf.
6. Communication from the commission to the European parliament, the European council, the council, the European economic and social committee and the committee of the

- regions. *The European Green Deal* [Электронный ресурс]/ European commission – Brussels. 11.12.2019. – 24 P. – Режим доступа: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=PDF.
7. Бюллетень о текущих тенденциях российской экономики. Экология и экономика: динамика загрязнения атмосферы страны в преддверии ратификации Парижского соглашения. [Электронный ресурс]/ Аналитический центр при правительстве РФ. Выпуск № 52, август 2019, – 24 С., – Режим доступа: <https://ac.gov.ru/files/publication/a/23713.pdf>.
 8. Volvo Cars to be fully electric by 2030. [Электронный ресурс]/ Volvocars Global Newsroom. – Gothenburg. 02.03.2019. – Режим доступа: <https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/pressreleases/277409/volvo-cars-to-be-fully-electric-by-2030>.
 9. Курс на электрификацию: какие авто бренды станут полностью электрическими к 2030 году. [Электронный ресурс]/ HEVCars информационный портал об электрических и гибридных автомобилях в Украине и мире. 06.05.2019. – Режим доступа: <https://hevcars.com.ua/reviews/kakie-avtobrendy-stanut-polnostyu-elektricheskimi-k-2030-godu/>.
 10. РАСПОРЯЖЕНИЕ № 3363-р [Электронный ресурс]/ Правительство РФ Москва. 27.11.2021. – 285 С. – Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZIOpQhL10nUT91RjCbeR.pdf>.
 11. *The automobile industry pocket guide 2021/2022* [Электронный ресурс]/ ACEA. – Brussels. September 2021. – 74 P. Режим доступа: https://www.acea.auto/files/ACEA_Pocket_Guide_2021-2022.pdf.
 12. Лузина, М. Аналитики прогнозируют двукратный рост мирового рынка электромобилей в 2021 году [Электронный ресурс]/ М. Лузина // АВТОСТАТ. Тольятти. 20.10.2021. – Режим доступа: <https://www.autostat.ru/news/49694/>.
 13. Roland I. *Global EV Sales for 2021 H1*. [Электронный ресурс]/ I.Roland // EV-volumes the electric vehicle world sales database. Trollhattan. 2021. – Режим доступа: <https://www.ev-volumes.com/country/total-world-plug-in-vehicle-volumes/>.
 14. Виктория, Л. В 2022 году на российском рынке ожидается более 10 новых моделей электрокаров. [Электронный ресурс]/ Л. Виктория // АВТОСТАТ. Тольятти. 09.11.21. – Режим доступа: <https://www.autostat.ru/articles/49827/>.
 15. Азам, Т. В России насчитывается около 53 млн. транспортных средств. [Электронный ресурс]/ Т. Азам// АВТОСТАТ. Тольятти. 21.02.2020. – Режим доступа: <https://www.autostat.ru/news/42973/>.
 16. Дмитрий, Л. Как и почему растет рынок электромобилей в России? [Электронный ресурс]/ Л. Дмитрий // АВТОСТАТ. Тольятти. 15.04.2021. – Режим доступа: <https://www.autostat.ru/infographics/47963/>.
 17. Gianfranco, P. *Electric and hybrid vehicles power sources, models, sustainability, infrastructure and the market* [Текст]/ P. Gianfranco. Rome. Elsevier. 2010. – 645 P.
 18. Mehrdad, E. *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design* [Текст]/ Mehrdad, E. Yimin G., Sebastien E. Ali E. CRC Press, West Florida. 2008. – 419 P.
 19. Екатерина Г. Развитие аккумуляторных батарей и перспективы снижения стоимости электромобилей [Электронный ресурс]/ Г.Екатерина // Энергетический центр бизнес-школы Сколково. Сколково. 03.04.2018. – Режим доступа: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/News/SKOLKOVO_EneC_2018.04.04_Grushevenko.pdf.
 20. Henze V. *Battery Pack Prices Cited Below \$100/kWh for the First Time in 2020, While Market Average Sits at \$137/kWh* [Электронный ресурс]/ V. Henze // BloombergNEF, New York. 16.10.21. – Режим доступа: <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/>.
 21. Вольдек, А. И. *Электрические машины. Машины переменного тока: Учебник для вузов* [Текст]/ А. И. Вольдек, В. В. Попов – СПб.: Питер, 2010. – 350 С.
 22. Waide, P. *Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems* [Электронный ресурс]/ P. Waide, C.U. Brunner// International Energy Agency Working Paper, Energy Efficiency Series.: Paris, 2011. – 132 P. – Режим доступа: https://iea.blob.core.windows.net/assets/d69b2a76-feb9-4a74-a921-2490a8fecd/EE_for_ElectricSystems.pdf.
 23. Merwerth, J. *The hybrid-synchronous machine of the new BMW i3 & i8 challenges with electric traction drives for vehicles*. [Электронный ресурс]/ J. Merwerth// BMW Group, Workshop University Lund: Lund, 20.03.2014. – Режим доступа: http://hybridfordonscentrum.se/wp-content/uploads/2014/05/20140404_BMW.pdf.