

ЭЛЕКТРОМОБИЛЬНЫЙ И ГИБРИДНЫЙ ТРАНСПОРТ: СИЛОВЫЕ СХЕМЫ, ОБОРУДОВАНИЕ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

В настоящее время в мировой практике автомобилестроения сложилась устойчивая тенденция применения электропривода для движения транспорта вместо двигателей внутреннего сгорания (ДВС) или в гибридных системах, сочетающих электро- и ДВС-приводы в различных долях «участия» в создании крутящего момента. Проведен анализ силовых структур наиболее развитых, имеющих практическое применение тяговых систем электро- и гибридного транспорта (электромобиль, гибриды с последовательной, параллельной и последовательно-параллельной силовыми установками). Дана оценка эксплуатационных возможностей рассмотренных систем в зависимости от степени электрификации гибридных автомобилей и влияния их на окружающую среду. Рассмотрен широкий круг публикаций в области создания стартер-генераторов и тяговых электродвигателей для гибридных автомобилей, начиная от микрогибридов и заканчивая полными гибридами, а также непосредственно электромобилей. Из них следует, что асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором и синхронные машины с электромагнитным возбуждением традиционно преобладают в разработках, доведенных до практического применения. Как наиболее перспективными, рассматриваются вентильная машина с постоянными магнитами, бесконтактная машина, синхронная машина с постоянными магнитами, вентильная индукторная машина с самовозбуждением и синхронная реактивная машина с независимым возбуждением. В качестве основных модулей силовой электроники рассматриваются в электромобилях только АИН, в гибридных – система УВН-АИН, выполненные по трехфазной мостовой схеме. Проведено сравнение основных характеристик традиционных свинцово-кислотных батарей и современных литиево-ионных, которые рассматриваются как наиболее перспективные. Отмечается, что ограниченность запасов лития требует искать новые направления в сфере создания эффективных накопителей энергии. Рассматриваются возможность и проблемы применения емкостных накопителей энергии, включая суперконденсаторы, как наиболее перспективные накопители. Отмечается также целесообразность дальнейшего развития концепции применения в электромобилях бортовых электрогенерирующих топливных элементов с использованием водородосодержащего топлива. Для оценки ситуации в России приведены показатели, характеризующие масштабность задач по развитию электротранспорта в стране в период 2020-2031 годов. Они приведены в документах Минэкономразвития РФ и нашли отражение в данной статье. В целом концепцию развития автомобилестроения сегодня целесообразно связать с водородными технологиями.

Ключевые слова: экологичность, силовые схемы, автомобильный электро- и гибридный транспорт, электропривод, ДВС-привод, электродвигатели, генераторы, силовая электроника, инверторы, выпрямители, накопители электроэнергии, аккумуляторы, конденсаторы, топливные элементы, концепция развития.

ВВЕДЕНИЕ

Начало развития электротранспорта связано с разработкой первых электродвигателей и элементов электропитания сначала на основе гальванических, а затем свинцово-кислотных аккумуляторных батарей. В России начало электродвижения отмечается со времени пробного испытания двигателя постоянного тока на небольшом судне на Неве в 1838 году. Двигатель был создан в 1834 году российским академиком Б.С. Якоби. В целом мировая история развития электромобилей начинается с 1835 года, когда шотландец Роберт Андерсон построил электромобиль-модель, который считается первым в истории [1].

Популярность и практическое применение электромобили получили в последнем десятилетии XIX века. Однако бурный рост в начале XX века производства автомобилей с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) быстро вытеснил электромобиль из системы автомобильного транспорта практически на 100 лет.

Сегодня около 80% выбросов вредных веществ в крупных городах приходится на долю автомобильного транспорта. При этом мало кто обращает внимание на то, что для сжигания 1 кг бензина необходимо затратить 2,9 кг кислорода [1], что в масштабах планеты приводит к расходу около 90% всего кислорода, выра-

батываемого наземной растительностью. Таким образом, проблема экологичности автотранспорта приобретает все большую актуальность. Особенно жестко она обострилась в крупных мегаполисах. По этой причине в XXI веке в мире сложилась устойчивая тенденция по созданию экологичных видов транспорта и в первую очередь электромобильного.

Таким образом, традиционный автомобильный транспорт с ДВС сегодня приобретает быстроразвивающегося конкурента в лице электромобиля и гибридного аналога, в котором сочетается тяговый электропривод с традиционным ДВС-приводом. По сути, как отмечается во многих источниках информации [1-5], сегодня наблюдается переломный момент в автомобильных технологиях в сторону электродвижения.

СИЛОВЫЕ СХЕМЫ ТЯГОВЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРО- И ГИБРИДНОГО ТРАНСПОРТА

Силовая энергетическая установка традиционного автомобиля состоит только из ДВС, при этом электрический стартер и генератор собственных нужд не входят в состав силовой установки, так как не реализуют главную функцию транспорта – движение.

В электромобиле силовая энергетическая установка состоит из одного или нескольких тяговых электродвигателей, при этом источником энергии является только аккумуляторная батарея (АБ) или другой накопитель энергии (рис. 1).

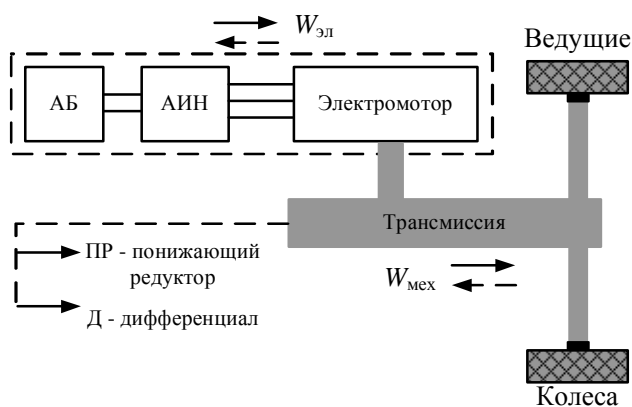


Рис. 1. Схема силовой установки электромобиля

Управляющим звеном в этой системе является автономный инвертор напряжения (АИН), если в качестве электродвигателя применяется трехфазный асинхронный или синхронный электродвигатели. В настоящее время они имеют широкое применение [6].

Долгое время тяговый электропривод в стране ассоциировался, прежде всего, с двигателями постоянного тока с реостатным регулированием с использованием релейно-контакторной аппаратуры [7]. Широтно-импульсные преобразователи (ШИП) постоянного тока и АИН с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) начали внедряться сравнительно недавно. Их применение позволяет осуществить качественное и экономичное регулирование момента тягового электропривода.

Основными препятствиями в области современного электроавтомобилестроения являются:

- высокие стоимостные и массогабаритные показатели аккумуляторных батарей и невысокие удельные энергетические характеристики, обусловленные недостаточным уровнем развития технологий в области их создания;
- отсутствие развитой инфраструктуры станций для зарядки аккумуляторов и других накопителей энергии;
- длительное время зарядки аккумуляторных батарей (до 6-8 часов);
- ограниченный диапазон пробега транспортного средства между подзарядками;
- недостатки, обусловленные также ограниченным ресурсом аккумуляторных батарей, опасными для жизни напряжениями в системе электропитания, отсутствием научно обоснованных последствий для окружающей среды при массовой утилизации.

Для создания развитой сети зарядных станций батарей электромобилей необходим уточненный прогноз по их загрузке, оценка требуемых дополнительных мощностей по производству и поставке электроэнергии.

Безусловно, отмеченные препятствия и проблемы в этой области будут решаться быстро в тех странах и автомобильных компаниях, где уже накоплен определенный опыт по проектированию и высокотехнологичному производству электромобилей, сделаны соответствующие инвестиции и осуществляется государ-

ственная поддержка данного направления, имеется законодательная база и налажен контроль по выполнению нормативных требований по ограничению вредных выбросов в окружающую среду.

Гибридный аналог электромобиля, несмотря на заметное усложнение силовой установки, получил сегодня более широкое распространение в классе автомобилей, как наилучшее промежуточное решение [8]. На их основе удастся сгладить явно выраженные недостатки как электромобиля, так и автомобиля на основе ДВС, а именно в 2 раза снизить выхлопы и на 20-30% экономить топливо при сохранении пробега без дозаправки (дозарядки). На рис. 2 приведены наиболее широко применяемые схемы гибридных силовых установок (ГСУ): последовательная схема, параллельная и последовательно-параллельная.

В рассматриваемых силовых схемах электродвигатели и генераторы представлены традиционными трехфазными машинами переменного тока.

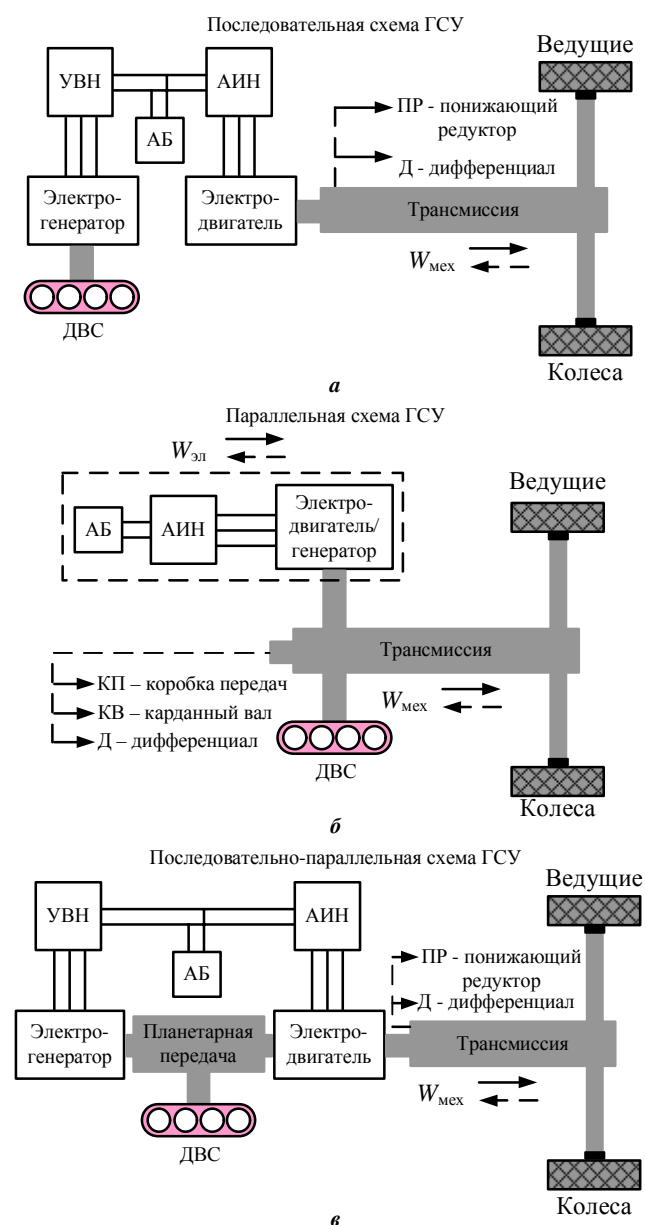


Рис. 2. Схемы гибридных силовых установок автотранспорта

В последовательной схеме ДВС может работать в заведомо экономичном режиме (минимальный расход топлива), вращая только генератор. Управление электроприводом ведущих колес осуществляется применением двухзвенного преобразователя частоты (ПЧ) по системе «управляемый выпрямитель напряжения» (УВН) – «автономный инвертор напряжения» (АИН), что обеспечивает требуемые силовые и скоростные диапазоны транспортного средства, включая торможение с рекуперацией энергии в АБ. Механическая трансмиссия в последовательной схеме ГСУ является наиболее простой. Она состоит из понижающего редуктора и дифференциала. В качестве недостатка следует отметить пониженный КПД передачи энергии от ДВС к ведущим колесам [8]. Это обусловлено двойным преобразованием энергии в системе «генератор-двигатель». Гибриды последовательного типа имеют преимущества в городском цикле движения, когда режимы разгона и торможения проявляются наиболее часто.

В параллельной схеме электромотор и ДВС могут работать одновременно через трансмиссию на ведущие колеса, что позволяет при необходимости суммировать их мощности. В условиях пониженной потребности в усилиях на ведущие колеса, а также при торможении электромотор переводится в режим генератора, что позволяет осуществлять подзарядку АБ. В городском режиме можно осуществлять движение только от аккумуляторной батареи. Также следует отметить, что данная система имеет более высокий КПД передачи энергии от ДВС к ведущим колесам. Однако доля энергии, запасаемая в АБ от генераторного режима электромотора, возвращается к ведущим колесам через двойное преобразование.

Недостатком данной системы является обязательное усложнение трансмиссии, так как ДВС требует применения ступенчатой механической передачи. Возможен вариант присоединения электромотора к другой паре колес, которые становятся ведущими от электромотора [5]. Это позволяет упростить трансмиссию от ДВС. Необходимо отметить, что в параллельной схеме периодически ведущая роль отводится ДВС, когда необходима подзарядка АБ от стационарного источника. Гибриды параллельного типа имеют преимущества при работе на магистральных маршрутах [8].

Последовательно-параллельная схема ГСУ в составе трансмиссии дополнительно содержит планетарную передачу, что безусловно приводит к её усложнению. С другой стороны, в данной схеме удастся в значительной степени использовать достоинства ДВС и электродвигателя, нивелируя их недостатки и, что очень важно, при их совместной работе повышается запас хода и увеличивается общий КПД силовой установки. Анализ предельных механических характеристик ДВС, проведенный в [9], показывает, что при решении задач оптимизации по минимуму потребления топлива необходимо осуществить выбор тягового электродвигателя с широкой зоной поддержания постоянства мощности. При объединении характеристик ДВС и электродвигателя можно получить результирующую механическую характеристику, близкую к идеальной.

Гибридные автомобили, использующие последовательно-параллельную схему, носят название Full Hybrid (дословно – полный гибрид). Соединенные через планетарный редуктор ДВС и ЭД могут передавать всю мощность на ведущие колеса. Наиболее известным представителем гибридных автомобилей с последовательно-параллельной схемой является компания Toyota и ее система Hybrid Synergy Drive (HSD) [2].

Необходимо также отметить, что система может работать раздельно, то есть как по схеме последовательного гибрида, так и по схеме параллельного.

В целом, как отмечается в [1], около 10% мощности ДВС современных автомобилей может обеспечить поддержание постоянной скорости 50 км/ч и в то же время 90% мощности используется только в режимах ускорения или движения на высокой скорости. Таким образом, совместное действие двух различных по природе создания крутящего момента двигателей в составе гибридного автомобиля может значительно усилить его возможности в широком скоростном диапазоне.

Целесообразно выдвинуть гипотезу: *«Совместное действие двух силовых установок может дать требуемый результат во многих случаях при заметно пониженной суммарной мощности ДВС и электродвигателя».*

Задача определения минимизированной суммарной мощности и соотношения мощностей ДВС и тягового электродвигателя требует исследования в рамках многокритериальной оптимизации.

КЛАССИФИКАЦИЯ ПО СТЕПЕНИ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ

В электромобилях, как известно, нет отдельных генераторов, так как основным источником питания в них является аккумуляторная батарея, а тяговый электродвигатель работает как генератор только при торможении.

В гибридных автомобилях силовые установки имеют различные соотношения мощностей электрических машин и ДВС. По степени электрификации автомобилей можно разделить на несколько групп.

Наименее электрифицированным является традиционный автомобиль с ДВС, в котором обычно отдельными электрическими машинами являются стартер и генератор, в качестве накопителя – низковольтная аккумуляторная батарея напряжением 12 В.

Гибридные автомобили имеют широкий диапазон степени электрификации. На самой низкой ступени этого показателя находятся микрогибриды, затем по мере повышения доли использования электрической энергии выделяют следующие группы [4]:

- мягкий (среднегибридный) гибрид (MHEV);
- полный гибрид (FHEV);
- гибридный автомобиль с подзарядкой от сети «Plug-in hybrids» (PHEV);
- электромобиль с возможностью увеличения запаса хода (REV).

Микрогибриды, находясь на низшем уровне классификации, больше следует относить к обычным автомобилям. Они отличаются наличием интеллектуальной системы, позволяющей отключать генератор на этапах разгона, снижая нагрузку на ДВС, и вырабатывать электроэнергию при замедлении, оказывая тормозное

действие. В источниках информации существуют разноречивые мнения о микрогибридах, как особой группе гибридных автомобилей, к которой формально приписываются функции системы «Start-Stop», которая автоматически глушит двигатель при остановках, дополнительно снижая расход топлива и выбросы продуктов сгорания в атмосферу. Отдельным микрогибридам приписывается возможность реализации функции рекуперативного торможения.

Мягкий (среднегибридный) гибрид (MHEV) в электрической части содержит одну электрическую машину под названием «стартер-генератор», позволяющей реализовать функции глушения ДВС до полной остановки. При торможении в этой системе вырабатывается электрическая энергия для подзарядки АБ и обеспечения внутренних потребителей электроэнергией. При разгоне система «Start-Stop», будучи более развитой, тратит энергию для увеличения крутящего момента на валу ДВС, то есть электрическая машина позволяет улучшить динамику автомобиля. В этой системе имеется 2 накопителя энергии: батарея 12 В и высоковольтная батарея 48 В, позволяющая в большей степени принять энергию рекуперативного торможения и вырабатывать значительно большую мощность при поддержке ДВС. Следует отметить, что среднегибридный силовой агрегат не позволяет обеспечить самостоятельную электрическую тягу автомобиля.

Полный гибрид (FHEV) позволяет реализовать движение транспортного средства за счет совместного действия электродвигателя и ДВС, а также отдельно при работе одного из двигателей. В автомобиле этой группы установлены электродвигатель достаточно большой мощности, высоковольтная АБ большой емкости накопления и более мощная силовая электроника.

Одним из удачных вариантов полного гибрида является электрополноприводный гибрид, в котором ДВС и электродвигатель приводят во вращение отдельно передние и задние колеса [10].

Полный гибридный автомобиль позволяет преодолевать короткие расстояния на городских скоростях без запуска ДВС и, соответственно, без расхода топлива.

При наличии эффективной системы рекуперации энергии от торможения нет необходимости заряжать гибриды от внешнего источника. ДВС в этих системах могут быть использованы для подзарядки АБ.

Гибридный автомобиль с подзарядкой от сети «Plug-in hybrids» (PHEV) обладает всеми преимуществами электроавтомобиля. Главным его недостатком остается ограниченность пробега между интервалами заряда от сети и потребностью обустройства сети зарядных станций. При использовании заряда АБ движение транспортного средства остается возможным за счет ДВС.

Электроавтомобиль с возможностью увеличения запаса хода (REV) также является гибридным автомобилем, хотя базовой основой является электроавтомобиль, в котором используется ДВС только для зарядки аккумулятора. ДВС при этом не может быть использован в качестве основного источника энергии.

ЭЛЕКТРОМОТОРЫ В ГИБРИДНЫХ УСТАНОВКАХ

Стартер-генераторы, являясь совмещенными электромеханическими преобразователями, заменяют две электрические машины – электродвигатель (стартер)

и генератор. Попытка их совмещения вызвана необходимостью снижения массогабаритных показателей гибридного транспорта. В электрическом транспорте обычно применяют две электрические машины (стартер и генератор) практически одинаковой мощности. Однако эти машины имеют совершенно различные механические и электромеханические характеристики. Стартер, как известно, работает кратковременно при относительно малой скорости, потребляя значительные величины тока для создания больших моментов в стартовом режиме, а генератор, наоборот, создает малые моменты сопротивления, работая в длительном режиме при высокой скорости.

Для уменьшения величины тока в стартерном режиме и габаритов стартер-генератора в бортовой сети, наряду с напряжением 12 В, в мягких гибридах создается напряжение 48 В. В полных гибридах применяются, как уже отмечалось, более мощные электродвигатели, позволяющие наряду со стартовым режимом работать при движении вместе с ДВС или самостоятельно преодолевать определенные расстояния.

В [11] проведен анализ разработок в области создания стартер-генераторов для гибридных автомобилей любого исполнения, начиная от микрогибридов и заканчивая полными гибридами. В них в качестве базовых приняты следующие электрические машины:

- асинхронная машина с короткозамкнутым ротором;
- синхронная машина с электромагнитным возбуждением;
- вентильная машина с постоянными магнитами;
- бесконтактная машина;
- синхронная машина с постоянными магнитами;
- вентильная индукторная машина с самовозбуждением.

Эти машины перечислены в последовательности уменьшения количества разработок на их основе.

Асинхронные и синхронные машины, являясь традиционными, продолжают оставаться основными в отечественном тяговом электроприводе. В материалах, приведенных в [12], отмечается, что крупные зарубежные компании, осуществляющие массовое производство электроавтомобилей и гибридных автомобилей, применяют в первую очередь СД с постоянными магнитами и АД с медной короткозамкнутой обмоткой ротора. Предполагается рост стоимости СД с постоянными магнитами, так как наблюдается непрерывный рост стоимости редкоземельных постоянных магнитов. В целом необходимо отметить, что преобладающим в применениях в электротранспорте пока остается АД с короткозамкнутым ротором [6].

В то же время необходимо отметить рост публикаций, в которых отражены результаты исследований, открывающие новые возможности нетрадиционных электрических машин, таких как *вентильная индукторная машина* с различными способами возбуждения (самовозбуждением, магнитоэлектрическим возбуждением и независимым возбуждением) [7, 9, 13-17] и *синхронная реактивная машина с независимым возбуждением* [18-28].

Вентильно-индукторный привод (ВИП) представляется во многих публикациях в качестве перспективного типа тягового электропривода. Наиболее обстоятельно его возможности обобщены в [9], где на основе анализа результатов длительных исследований особо выделяется **ВИП с независимым возбуждением**. Отмечается, что данная машина является передовой отечественной разработкой, которая может стать базовой для перевооружения электрического транспорта, для создания отечественных гибридных транспортных средств нового поколения на основе объединения достижений электромеханики, силовой и управляющей электроники с использованием сетевых технологий. ВИП в сравнении с традиционными АД и СД с электромагнитным возбуждением и СД с постоянными магнитами обладают рядом достоинств [9, 16-18]:

- простота, технологичность, ремонтпригодность и устойчивость к механическим воздействиям, существенно меньшая стоимость по сравнению с СД с постоянными магнитами;

- широкий диапазон рабочих скоростей – от нескольких об/мин до 10 тыс.;

- замечательные регулировочные возможности, обеспечивающие типовую тяговую характеристику транспортного средства и широкий диапазон регулирования в зоне ослабления поля – до 10:1.

В то же время в [7] отмечается, что вентильно-индукторная машина с независимым возбуждением при всех отмеченных преимуществах еще не доработана до оптимальной конструкции и сложнее в изготовлении по сравнению с классической вентильно-индукторной машиной с самовозбуждением. В этой связи они пока не находят массового применения в качестве тяговых электродвигателей по многим причинам [12].

Синхронная реактивная машина с независимым возбуждением (СРМНВ) является не менее перспективной системой тягового электропривода, имеющая в сравнении с АД увеличенный удельный момент на 30-40%, облегченный тепловой режим за счет «холодного» ротора, а благодаря простоте конструкции ротора и малым затратам меди становится дешевле на 15-25% [19]. О больших потенциальных возможностях этой машины отмечается и в зарубежных публикациях, как, например, [20, 21]. В отечественных публикациях по тематике СРМНВ [22-31] приведены результаты исследований, посвященные вопросам теории и практики СРМНВ в плане применения их в тяговом электроприводе, как наиболее перспективного типа.

Достоинства СРМНВ и ВИП с независимым возбуждением во многом совпадают. В частности, наряду с простотой конструкции и повышенной надежностью, отмечается высокая перегрузочная способность по моменту (до 10 крат) [19, 24, 25, 30], повышенная *живучесть и технологичность изготовления*, обусловленные возможностью изготовления в корпусе серийного АД с простой однослойной обмоткой статора. Кроме этого, выделяются такие преимущества, как простая система управления преобразователем, малые величины электромагнитной и механической инерции при управлении по каналам якоря и возбуждения, а также возможность получения высоких угловых скоростей благодаря большой механической прочности ротора.

В целом целесообразно отметить, что в современном гибридном и электрическом транспорте наибольшее развитие получил асинхронный короткозамкнутый двигатель, который по совокупности эксплуатационных показателей и соотношению цена-качество, благодаря развитию силовой электроники, реализующей частотное регулирование АД, систем и алгоритмов микропроцессорного управления удовлетворяет основным требованиям, предъявляемым тяговому электроприводе.

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Современная силовая электроника, получив стремительное развитие благодаря широкому применению в промышленных электроприводах и технологических установках, успешно начала внедряться в современный электротранспорт и во многие области жизнедеятельности. При этом электромобили/гибридные автомобили становятся самыми массовыми потребителями приборов силовой электроники для тяговых электроприводов, в системах быстрой зарядки и управления накопителями энергии.

В основе элементной базы преобразователей лежат современные полностью управляемые транзисторные/тиристорные ключи (IGBT, GCT, IGCT, SIT и др.). Самым динамичным сегодня является рынок IGBT силовых модулей. Его расширение происходит и за счет применения их в электромобильном/гибридном транспорте.

Основными функциональными модулями силовой автономной электроники, как это видно из схем силовых установок электромобилей/гибридных автомобилей (**рис. 1 и 2**), являются «автономный инвертор напряжения» (АИН) и «управляемый выпрямитель напряжения» (УВН). В электромобилях используются только АИН, а в гибридных – система УВН-АИН. Все модули выполнены по трехфазной мостовой схеме (**рис. 3**).

Целесообразно подчеркнуть, что управляемый выпрямитель напряжения и автономный инвертор напряжения являются **обратимыми преобразователями напряжения (ОПН)** [32], то есть могут работать в выпрямительном и инверторном режиме, передавая энергию из сети переменного тока в цепь постоянного и обратно, то есть меняя направление потока мощности. На основе двух ОПН созданы современные рекуперирующие преобразователи частоты (**рис. 4**). Необходимо отметить, что применительно к современным традиционным трехфазным двигателям силовая электроника на основе трехфазных модулей является эффективным средством управления процессами электромеханического преобразования энергии.

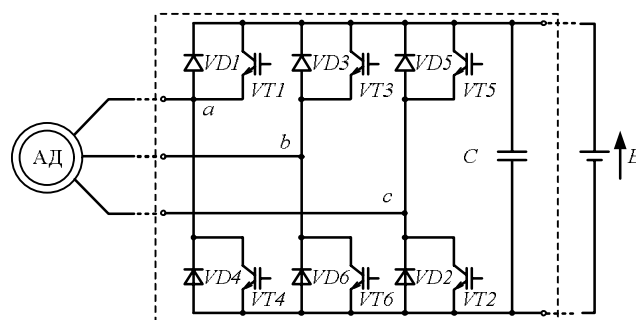


Рис. 3. Схема трехфазного модуля УВН/АИН

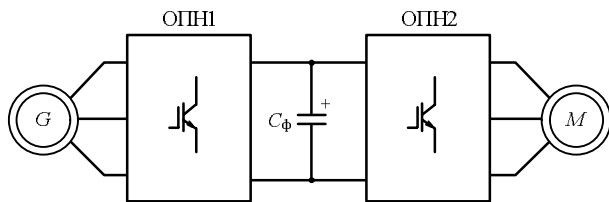


Рис. 4. Структура системы УВН-АИН

ТЯГОВЫЕ АККУМУЛЯТОРНЫЕ БАТАРЕИ И ДРУГИЕ НАКОПИТЕЛИ И ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Аккумуляторные батареи в транспортных средствах являются традиционными накопителями электрической энергии и в зависимости от назначения (условий эксплуатации) к ним предъявляются различные требования. В традиционном автомобильном транспорте они изначально применялись в качестве стартерных. Такие АБ, как известно, весьма чувствительны к глубокому разряду, приводящему к безвозвратной частичной потере емкости. По этой причине их нельзя использовать в качестве тяговой батареи.

Целесообразно отметить, что основным требованием к тяговым АБ является устойчивость к глубокому разряду с поддержанием номинального напряжения до практически полной разрядки. В процессе работы они в среднем разряжаются до 80% от своей номинальной емкости и после зарядки восстанавливаются без потери емкости.

При создании современных тяговых батарей ставятся задачи по повышению максимальных показателей плотности энергии, запасенной на единицу объема, без существенного увеличения стоимостных показателей [1] и повышения количества циклов перезарядки, то есть длительности эксплуатации. Известно, что старые технологии свинцово-кислотных батарей обеспечивают удельную энергоемкость на уровне 90 Вт·ч/кг, а литиево-ионные элементы сегодня обеспечивают удельную энергоемкость, равную 175 Вт·ч/кг. Теоретический максимум для таких батарей определяется более чем в 300 Вт·ч/кг.

Литиевые АБ постоянно совершенствуются для применения в электромобилях и гибридах. В отношении их отмечаются следующие преимущества:

- высокая энергоемкость, позволяющая снизить габариты;
- быстрый заряд;
- надежная работа в режиме заряд-разряд.

В качестве недостатков обычно отмечают высокую стоимость, необходимость принятия дополнительных мер безопасности. Ограниченность запасов лития заставляет искать новые направления в сфере создания эффективных накопителей электрической энергии.

Емкостные накопители электрической энергии во многих публикациях рассматриваются в качестве альтернативных химическим элементам [33] или им отводится вспомогательная роль приемника большой порции электроэнергии за короткое время при торможении с последующей отдачей в аккумуляторную батарею. При этом среди требований к емкостному накопителю выделяются следующие:

- напряжение емкостного накопителя при полном заряде должно в 2–3 раза превышать номинальное напряжение тягового двигателя, так как при разряде

батареи до половины от начального напряжения отдается 75% начальной энергии, а при более глубоком разряде, например при достижении 33% начального напряжения, отдается 91% изначально запасенной энергии [33].

- удельная по массе энергия – не менее 20000 Дж/кг;

- максимальный саморазряд не более 20% в сутки;
- срок службы – не менее 10 лет.

Увеличение удельной запасаемой энергии, как известно, возможно либо за счет увеличения емкости, либо за счет увеличения напряженности электрического поля конденсатора. В условиях ограничения напряжения заметное увеличение удельной по массе энергии емкостного накопителя может быть достигнуто применением суперконденсаторов.

Топливные элементы (ТЭ) являются одними из перспективных бортовых электрогенерирующих установок. Они предназначены для получения электрической энергии из водородосодержащего топлива в результате электрохимической реакции [2]. Проблеме развития водородной энергетики и совершенствованию ТЭ на основе водорода уделено всестороннее внимание в материалах [34], опубликованных в Вестнике РАН. Главная идея перехода на водородную энергетику: использование водорода как основного энергоносителя и ТЭ как генераторов электрической энергии.

ТЭ не способны накапливать электрическую энергию и предназначены для постоянной выработки электроэнергии. В них осуществляется прямое преобразование химической энергии топлива в электрическую. При этом побочными продуктами являются водяной пар и незначительное количество углекислого газа, не наносящие значительного вреда окружающей среде.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

В зарубежном мире появление первых серийно выпускаемых электромобилей произошло 20 лет назад, когда заявила о себе всемирно известная компания Tesla Motors, финансируемая известным Илоном Маском, основателем ряда известных компаний, работающих в сфере высоких технологий [35]. В 2018 году компанией продано свыше 245 тыс. электромобилей. На фоне стремительного роста продаж, автопроизводители многих развитых стран демонстрируют заинтересованность в увеличении выпуска широкого спектра собственных электромобилей.

Состояние дел и перспективы в России к настоящему времени характеризуются тем, что постановлением правительства РФ от 7 ноября 2020 года утверждена дорожная карта, подготовленная департаментом стратегического развития и инноваций, в которую внесена важная позиция о развитии электротранспорта в стране. В ней сформулирована необходимость создания единого подхода к развитию электротранспорта путем утверждения методических рекомендаций субъектам России по их внедрению и развитию зарядной инфраструктуры, а также разработки мер по стимулированию использования электромобилей. Масштабность поставленной задачи нашла отражение в концепции по развитию производства и использованию

электротранспорта в России на период до 2030 года. Минэкономразвития РФ в этом документе сообщило первые параметры данной концепции: 1,5 млн электромобилей на дорогах страны к 2030 году, 20 000 зарядных станций, инвестиции в размере 418 млрд руб. Предпосылкой к этому явились проекты и первые образцы электромобилей Российского автопрома [36, 37]. Это электромобиль «Кама-1», созданный в 2020 году инжиниринговым центром Санкт-Петербургского политехнического университета им. Петра Великого при индустриальном партнерстве КамАЗа, современный электромобиль Zetta, а также более ранние проекты и образцы 80-х годов прошлого века электромобилей АвтоВАЗа.

В энергетической стратегии России на период до 2035 года (ЭС-2035), принятой в июне 2020 года, особое внимание уделено водородной тематике. Определен комплекс ключевых мер по производству, транспортировке и потреблению водорода. Среди них необходимо выделить проблему стимулирования спроса на внутреннем рынке на топливные элементы с использованием водорода для транспорта.

Электромобилестроение в Казахстане характеризуется достижениями крупнейшего завода «СарыаркаАвтоПром» – лидера машиностроения в республике. Это первое в стране предприятие, которое наладило выпуск автомобилей, в том числе электробусов и электромобилей [38].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ состояния современного уровня развития теории и практики электромобилестроения за рубежом и в России на основе изучения материалов, отраженных в научных публикациях, в интернет-ресурсах и средствах массовой информации.

Рассмотрен круг вопросов, отражающих уровень и основные направления развития электромобилестроения. Представлены основные силовые схемы тяговых систем электромобилей и гибридного транспорта и проведено обоснование их применения в зависимости от технических характеристик транспортных средств и условий эксплуатации.

Отмечены нерешенные на сегодняшний день проблемы, препятствующие интенсификации процессов в сфере производства электромобилей и гибридов для массового использования. Наиболее острыми являются проблемы с накопителями электрической энергии, обусловленные их высокой стоимостью и недостаточной надежностью в эксплуатации, отсутствием развитой инфраструктуры для их зарядки. Эти проблемы взаимосвязаны и не могут решаться в отдельности. При этом следует считать, что гибридные автомобили позволяют преодолеть эти временные проблемы.

Современное электромоторостроение для автомобильного транспорта продолжает оставаться ориентированным на производство традиционных асинхронных и синхронных электродвигателей. Для них сегодня создана развитая силовая электроника, реализующая частотное регулирование АД, устройств и алгоритмов микропроцессорного управления, удовлетворяющие основным требованиям, предъявляемым к тяговому электроприводу.

Перспективные по ряду эксплуатационных показателей нетрадиционные электроприводы, такие как вентильно-индукторный привод (ВИП) и приводы на основе синхронных реактивных машин с независимым возбуждением (СРМНВ), крайне медленно развиваются в направлении их доработки для широкого практического применения. Для них сегодня отсутствуют разработки для практического применения устройства управляющей и силовой электроники.

Концепция развития электротранспорта в России, разработанная в 2020 году на период до 2030 года, предусматривает осуществление резкого скачка в сфере производства электромобилей и создания зарядной инфраструктуры.

В качестве отдельной ветви в сфере электромобилестроения следует рассматривать создание электромобилей с применением топливных элементов в качестве бортовых электрогенерирующих установок с использованием водородосодержащего топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ютт В.Е., Строганов В.И. Электромобили и автомобили с комбинированной установкой. Расчет скоростных характеристик: учеб. пособие. М.: МАДИ, 2016. 108 с.
2. Энергоустановки автомобильного транспорта с тяговым электроприводом: монография / Лежнев Л.Ю., Хрипач Н.А., Шустров Ф.А., Папкин Б.А., Петриченко Д.А., Иванов Д.А., Татарников А.П., Коротков В.С., Неверов В.А. Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком», 2017. 204 с.
3. Тойлыбаев А.Е., Сейімхан С. Электромобиль – транспорт будущего // *Universum: Технические науки*. 2018. № 5(50). 4 с.
4. Дирекция по экономике отраслей ТЭК: информационная справка // *Электрический и гибридный автотранспорт в мире – Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации*, декабрь 2013. 12 с.
5. Конструктивные схемы автомобилей с гибридными силовыми установками: учеб. пособие / Бахмутов С.В., Карунин А.Л., Круташов А.В., Ломакин В.В., Селифонов В.В., Карпукхин К.Е., Баулина Е.Е., Урюков Ю.В. М.: МГТУ «МАМИ», 2007. 71 с.
6. Флоренцев С.Н., Изосимов Д.Б. Результаты и планы создания комплектного тягового электрооборудования электромеханических трансмиссионных транспортных средств // *Труды VII Международной (XIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу*. Иваново: ИГЭУ, 2012. С. 438-445.
7. Состояние и перспективы развития городского гибридного и электрического тягового электропривода в России / А.С. Ануцин, Д.И. Алямкин, В.Ф. Казаченко, М.М. Ляшкевич // *Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу*. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. С. 24-28.
8. Электромобиль. Состояние и перспективы / А.В. Долголаптев, О.Г. Дашко, Г.Б. Онищенко, Е.А. Смотров // *Труды VII Международной (XIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу*. Иваново: ИГЭУ, 2012. С. 431-435.
9. Казаченко В.Ф., Остриров В.Н., Русаков А.М. Перспективные типы тяговых электроприводов // *Труды VII Международной (XIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу*. Иваново: ИГЭУ, 2012. С. 16-22.
10. Официальный сайт Auto.ru. URL: <https://www.mag.auto.ru/article/hybrids/> (дата обращения 28.12.2021)

11. Овсянников Е.М., Клюкин П.Н. Стартер-генераторные устройства для двигателей внутреннего сгорания автомобилей // *Материалы международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ»*. М.: МГТУ «МАМИ», 2010. С. 135-138.
12. Шумов Ю.Н., Сафонов А.С. Энергосберегающие электрические машины для привода электромобилей и гибридных автомобилей (Обзор зарубежных разработок) // *Электричество*. 2016. №1. С. 55-65.
13. Ильинский Н.Ф. Вентильно-индукторный электропривод – проблемы и перспективы развития // *Доклады научно-практического семинара*. М.: Изд-во МЭИ, 2006. С. 4-14.
14. Бычков М.Г. Элементы теории вентильно-индукторного электропривода // *Электричество*. 1997. №8. С. 35-44.
15. Николаев В.В. Стартер-генератор автономных объектов на основе вентильно-индукторной машины: дис. ... канд. техн. наук 05.09.01 / Николаев В.В. М., 2005.
16. Темиров А.П. Опыт разработки вентильно-индукторных электроприводов ПКП «ИРИС» // *Доклады научно-практического семинара*. М.: Изд-во МЭИ, 2006. С. 84-101.
17. Козаченко В.Ф., Остриров В.Н., Лашкевич М.М. Электротрансмиссия на базе вентильно-индукторного двигателя с независимым возбуждением // *Электротехника*. 2014. №2. С. 54-60.
18. Амангалиев Е.З., Тлеугали У.К. Вентильно-индукторный двигатель и его особенности // *Архивариус*. 2020. № 5(50). С. 28-32.
19. Усынин Ю.С. Системы управления электроприводов: учеб. пособие для вузов. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. 328 с.
20. Lipo T. Advanced Motor Tecnologics: Converter Fed Machines // *IEEE Trans*. 1997. No. 7. Pp. 204-222.
21. Law J.D., Chertok A., Lipo T.A. Design and Performance of Field Regulated Reluctance Machine // *IEEE Trans. on Industry Applications*. 1994. No. 5. Pp. 1185-1193.
22. Усынин Ю.С., Григорьев М.А., Виноградов К.М. Электроприводы и генераторы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения // *Электричество*. №3. 2007. С. 21-26.
23. New Brushless Synchronous Machine For Vehicle Application / Yu. Usinin, M. Grigorjev, K. Vinogradov, S. Gladyshev // *SAE International Word Congress Detroit. Michigan*, 2007. doi: 10.4271/2007-01-0785
24. Григорьев М.А. Предельные возможности электроприводов с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика*. 2009. № 12. С. 51-55.
25. Усынин Ю.С., Виноградов К.М. Генераторная установка с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика*. 2007. №7. С. 37-39.
26. Григорьев М.А. Вентильный электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения: монография. Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2010. 159 с.
27. Удельные показатели электроприводов с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения в разных схемах включения / Д.А. Сычев, У.В. Белоусов, А.М. Журавлев, А.Е. Бычков // *Электротехнические системы и комплексы*. 2013. №21. С. 21-27.
28. Тяговый электропривод активного прицепа трубовоза / Ю.С. Усынин, А.Н. Шишков, А.Н. Горожанкин, А.Е. Бычков, Е.В. Белоусов, А.М. Журавлев, Д.А. Сычев // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика*. 2013. Т.13. №1. С. 137-143.
29. Усынин Ю.С., Григорьев М.А., Шишков А.Н. Моделирование электропривода активного прицепа // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика*. 2013. Т.13. №2. С. 106-113.
30. Савостеев Н.В., Усынин Ю.С. Перспективы развития стартер-генераторов для промышленных транспортных средств // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика*. 2020. Т. 20. №4. С. 96-102. doi: 10.14529/power200411
31. Григорьев М.А., Наумович Н.И., Белоусов Е.В. Тяговый электропривод электромобиля // *Электротехника*. 2015. №12. С. 53-56.
32. Гельман М.В., Дудкин М.М., Преображенский К.А. Преобразовательная техника: учеб. пособие. Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2009. 425 с.
33. Строганов В.И., Сидоров К.М. Математическое моделирование основных компонентов силовых установок электромобилей и автомобилей с КЭУ: учеб. пособие. М.: МАДИ, 2015. 100 с.
34. Месяц Г.А., Прохоров М.Д. Водородная энергетика и топливные элементы // *Вестник Российской академии наук*. 2004. Т. 74. №7. С. 579-597.
35. Сайт Topor. Info – обо всём интересном из мира, науки, технологий и общества. URL: [https://www/topor.info/news/avtomobil-tesla](https://www.topor.info/news/avtomobil-tesla) (дата обращения 28.12.2021)
36. Сайт Kazanfirst.ru: Сетевое издание – Татцентр.ру. URL: https://www.kazanfirst.ru/articles/534913?utm_source=uxnews&utm_medium=desktop (дата обращения 28.12.2021)
37. Сайт журнала Автоброкер Клуб: Официальный сайт журнала. URL: <https://www.journal.ab-club.ru/articles/vse-fakty-o-zetta-pervom-serijnom-elektromobile-iz-rossii/> (дата обращения 28.12.2021)
38. Официальная страница интернет издания tengrnews.kz. URL: <https://www.informburo.kz/special/teper-i-na-elektricheskoy-tyage-kak-v-too-saryarkaavtoprom-proizvodiyat-avtobusy.html>; <https://tengrnews.kz/tag/электромобили/> (дата обращения 28.12.2021)

Поступила в редакцию 08 декабря 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ELECTRIC AND HYBRID TRANSPORT. POWER CIRCUITS, EQUIPMENT, PROBLEMS AND DEVELOPMENT PROSPECTS

Erlan Z. Amangaliev

Assistant Professor, Power Supply and Renewable Energy Sources Department, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, Republic of Kazakhstan, amangaliev_erlan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2842-2702>

Anvar S. Sarvarov

D.Sc. (Engineering), Professor, Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, anvar@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0529-4488>

Valery I. Kosmatov

Ph.D. (Engineering), Professor, Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-1985-3244>

Michael Yu. Petushkov

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Electronics and Microelectronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, m.petushkov@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4154-375X>

Evgeniy Ya. Omelchenko

D.Sc. (Engineering), Professor, Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-0547-485X>

Currently, there is a steady tendency in the global automotive industry to use electric propulsion instead of internal combustion engines (ICE) or in hybrid systems that combine electric and internal combustion engines in various proportions of participation in torque generation. The analysis of power structures applied in the most developed traction systems for electric and hybrid vehicles (electric car, hybrids with serial, parallel and series-parallel power plants) has been performed. The paper assesses the considered system operational capabilities depending on the electrification degree of hybrid vehicles and their impact on the environment. A wide range of publications in the field of starter generators development and traction electric motors for hybrid cars, from micro-hybrids to full hybrids, as well as electric cars themselves, are considered. It follows from them that asynchronous motors with short-circuit rotor and synchronous machines with electromagnetic excitation traditionally prevail in developments brought to practical application. Permanent magnet valve machine, contactless machine, permanent magnet synchronous machine, self-excitation valve inductor machine and independent excitation synchronous reactor machine are considered to be the most promising. As the main modules of the power automobile electronics are considered in electric cars only SVI, in hybrid ones - the CVR-SVI system, made by a three-phase bridge circuit. The main characteristics of traditional lead-acid batteries and modern lithium-ion batteries, which are considered the most promising, are compared. It is noted that limited lithium reserves require the search for new directions in the sphere of effective energy accumulators development. Possibility and problems of using capacitive energy storage devices, including supercapacitors, as the most perspective energy storage devices are considered. It is also noted the expediency of further development of the application concept for on-board electric generating fuel cells using hydrogen-containing fuel in electric cars. To assess the situation in Russia, indicators describing the scale of the tasks for electric transport development in the country for the period of 2020-2031 are given. They are given in the Economic Development Ministry documents of the Russian Federation and are reflected in this article. In general, it is reasonable to link the concept of electric vehicle development today with hydrogen technologies.

Keywords: environmental friendliness, power circuits, automotive electric, hybrid vehicles, electric drive, internal combustion engine, electric motors, generators, power electronics, inverters, rectifiers, energy storage, batteries, capacitors, fuel cells, development concept.

REFERENCES

1. Yutt V.E., Stroganov V.I. *Elektromobili i avtomobili s kombinirovannoy ustanovkoy. Raschet skorostnkh kharakteristik: ucheb. posobie* [Electric cars and cars with combined unit. Calculation of Speed Characteristics: Tutorial]. Moscow, MADI Publ., 2016. 108 p. (In Russian)
2. Lezhnev L.Y., Hripach N.A., Shustrov F.A., Papkin B.A., Petrichenko D.A., Ivanov D.A., Tatamikov A.P., Korotkov V.S., Neverov V.A. *Energoustanovki avtomobilnogo transporta s tyagovym elektropriivodom* [Power plants of automobile transport with a traction electric drive]. Tambov, LLC "Consulting company Yukom" Publ., 2017. 204 p. (In Russian)
3. Toilibaev A.E., Seyimkhan S. Electric vehicle - transport of the future. *Universum: Tekhnicheskie nauki*. [Universum. Technical Science], 2018, no. 5(50), 4 p. URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/5902> (In Russian)
4. Directorate for Economics of Fuel and Energy Industries: Fact Sheet. *Elektricheskiy i gibridnyi avtotransport v mire – Analiticheskiy tsentr pri pravitelstve Rossiyskoy Federatsii* [Electric and Hybrid Vehicles in the World - Analytical Center under the Government of the Russian Federation], December 2013. 12 p. (In Russian)
5. Bakmutov S.V., Karunin A.L., Krutashov A.V., Lomakin V.V., Selifonov V.V., Karpukhin K.E., Baulina E.E., Uryukov Yu.V. *Konstruktivnye skhemy avtomobiley s gibridnymi silovymi ustanovkami: Uchebnoe posobie* [Design schemes of the vehicles with the hybrid power plants: tutorial]. Moscow, Moscow State Technical University "MAMI" Publ., 2007. 71 p. (In Russian)
6. Florentsev S.N., Izosimov D.B. Results and plans for the creation of a complete traction electric equipment of electromechanical transmissions of vehicles. *Trudy VII Mezhdunarodnoy (XIII Vserossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektropriivodu* [Proceedings of the VII International (XIII All-Russian) Scientific and Technical Conference on Automated Electric Drives]. Ivanovo, Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin, 2012, pp. 438-445. (In Russian)
7. Anuchin A.S., Aliamkin D.I., Kazachenko V.F., Lyashkevich M.M. State and development prospects of urban hybrid and electric traction electric drive in Russia. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektropriivodu* [Proceedings of VIII International (XIX All-Russian) Scientific and Technical Conference on Automated Electric Drive]. Saransk: Mordov. Univ. Publisher, 2014, pp. 24-28. (In Russian)
8. Dolgolaptev A.V., Dashko O.G., Onishchenko G.B., Smotrov E.A. Electric Vehicle. Status and Prospects. *Trudy VII Mezhdunarodnoy (XIII Vserossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektropriivodu* [Proceedings of the VII International (XIII All-Russian) Scientific and Technical Conference on Computer-Aided Electric Drives]. Ivanovo, Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin, 2012, pp. 431-435. (In Russian)
9. Kazachenko V. F., Ostrirov V. N., Rusakov A. M. Perspective types of traction electric drives. *Trudy VII Mezhdunarodnoy (XIII Vserossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektropriivodu* [Proceedings of the VII International (XIII All-Russian) Scientific and Technical Conference on Computer-Aided Electric Drives]. Ivanovo, Ivanovo State Power University named after Lenin, 2012, pp. 16-22. (In Russian)
10. Auto.ru. Available at: magazine:mag.auto.ru/article/hybrids/ (accessed 28 December 2021) (In Russian)

11. Ovsyannikov E.M., Klukin P.N. Starter-generator devices for internal combustion engines in cars. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii AAI «Avtomobile – i traktorostroenie v Rissii: priopitety razvitiya i podgotovka kadrov», posvyascshennoy 145 –letiyu MGTU «MAMI»* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference AAI "Automotive and Tractor Construction in Russia: Development Priorities and Staff Training" dedicated to the 145th anniversary of the Moscow State Technical University "MAMI"]. Moscow, MSTU "MAMI" Publ., 2010, pp. 135-138. (In Russian)
12. Shumov Yu.N., Safonov A.S. Energy-saving electric machines for electric and hybrid cars drive (Review of foreign developments). *Elektrichestvo* [Electricity], 2016, no. 1, pp. 55-65. (In Russian)
13. Ilyinskii N.F. Valve-inductor electric drive - problems and prospects for development. *Doklady nauchno-prakticheskogo seminar* [Reports of a scientific-practical seminar]. Moscow, MPEI Publishing House, 2006, pp. 4-14. (In Russian)
14. Bychkov M.G. Elements of the theory of a valve-inductor electric drive. *Elektrichestvo* [Electricity], 1997, no. 8, pp. 35-44. (In Russian)
15. Nikolaev V.V. *Starter-generator avtonomykh obyektoy na osnove ventilno-induktornoy mashiny*. Kand.Diss. [Starter-generator of the autonomous objects on the basis of the valve-inductor machine. Ph.D.Diss.]. Moscow, 2005. 145 p.
16. Temirev A.P. Development of the valve-inductor electric drives by PKP "IRIS". *Doklady nauchno-prakticheskogo seminar* [Reports of scientific-practical seminar]. MPEI Publishing House, 2006, pp. 84 -101. (In Russian)
17. Kozachenko V.F., Ostrirov V.N., Lashkevich M.M. Electric Power Transmission on the Basis of Valve Inductor Motor with Independent Excitation. *Electrotehnika* [Electrical Engineering], 2014, no.2, pp. 54-60. (In Russian)
18. Amangaliev E.Z., Tleugali U.K. Valve-inductor motor and its features. *Arkhivarius* [Registrar], 2020, no. 5(50), pp. 28-32. (In Russian)
19. Usynin Yu.S. *Sistemy upravleniya elektropriwodov* [Control systems for the electric drives]. Chelyabinsk, Publishing house of SUSU, 2004. 328 p. (In Russian)
20. Lipo T. Advanced Motor Tecnologics: Converter Fed Machines. *IEEE Trans*, 1997, no. 7, pp. 204-222.
21. Law J.D., Chertok A., Lipo T.A. Design and Performance of Field Regulated Reluc-tance Machine. *IEEE Trans. on Industry Applications*, 1994, no. 5, pp. 1185-1193.
22. Usynin Yu.S., Grigoriev M.A., Vinogradov K.M. Electric drives and generators with synchronous reactive machine of independent excitation. *Elektrichestvo* [Electricity], 2007, no. 3, pp. 21-26. (In Russian)
23. Usinin Yu., Grigorjev M., Vinogradov K., Gladyshev S. New Brushless Synchronous Machine For Vehicle Application / (The University of Michigan-Dearborn). SAE International 2007 World Congress Detroit, Michigan, 2007. doi: 10.4271/2007-01-0785
24. Grigoriev M.A. Limiting possibilities of the electric drives with the synchronous reactive machine of independent excitation. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Energetika* [Bulletin of SUSU. Series "Power Engineering"], 2009, no. 12, pp. 51-55. (In Russian)
25. Usynin Yu.S., Vinogradov K.M. Generating installation with a synchronous independent excitation reluctance machine. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Energetika* [Bulletin of SUSU. Series "Power Engineering"], 2007, no. 7, pp. 37-39. (In Russian)
26. Grigoriev M.A. *Ventilnyi elektropriwod s sinkhronnoy reaktivnoy mashinoy nezavisimogo vozvuzhdeniya* [Valve electric drive with synchronous reactive machine of independent excitation]. Chelyabinsk, Publishing Center of SUSU, 2010. 159 c. (In Russian)
27. Sychev D.A., Belousov U.V., Zhuravlev A.M., Bychkov A.E. Specific indices of electric drives with the synchronous reactive machine of independent excitation in various schemes of switching. *Electrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2013, no. 21, pp. 21-27. (In Russian)
28. Usynin Yu.S., Shishkov A.N., Gorozhankin A.N., Bychkov A.E., Belousov E.V., Zhuravlev A.M., Sychev D.A. Traction electric drive of an active pipe truck trailer. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Energetika* [Bulletin of SUSU. Series: Power Engineering], 2013, vol. 13, no. 1, pp. 137-143. (In Russian)
29. Usynin Y.S., Grigoriev M.A., Shishkov A.N. Simulation of active trailer electric drive. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Energetika* [Bulletin of SUSU. Series: Power Engineering], 2013, vol. 13, no. 2, pp. 106-113. (In Russian)
30. Savosteenko N.V., Usynin S. Prospects for the development of starter generators for industrial vehicles. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Energetika* [Bulletin of SUSU. Series: Power Engineering], 2020, vol. 20, no. 4, pp. 96-102. doi: 10.14529/power200411 (In Russian)
31. Grigoriev M.A., Naumovich N.I., Belousov E.V. Traction electric drive of electric vehicle. *Electrotehnika* [Electrical Engineering], 2015, no. 12, pp. 53-56. (In Russian)
32. Gelman M.V., Dudkin M.M., Preobrazhenskiy K.A. *Preobrazovatel'naya tekhnika* [Converting technique]. Chelyabinsk, Publishing Center of SUSU, 2009. 425 p. (In Russian)
33. Stroganov V.I., Sidorov K.M. *Matematicheskoe modelirovanie osnovnykh komponentov silovykh ustanovok elektromobiley i abtomobiley s KEU* [Mathematical Modeling of the Main Components of Power Units of Electric Vehicles and Cars with CEU]. Moscow, MADI Publ., 2015. 100 p. (In Russian)
34. Mesyats G.A., Prokhorov M.D. Hydrogen Energy and Fuel Cells. *Vestnik Rossiyskoi akademii nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences], 2004, vol. 74, no. 7, pp. 579-597. (In Russian)
35. Topor. Info - Site about everything interesting from the world, science, technology and society. Available at: <https://topor.info/news/avtomobil-tesla>; <https://topor.info/news/proekty-elona-maska>. (accessed 28 December 2021)
36. Kazanfirst.ru: Network edition - Tattser.ru. Available at: https://kazanfirst.ru/articles/534913?utm_source=yxnews&utm_medium=desktop. (accessed 28 December 2021)
37. Autobroker Club magazine: official website of the magazine. Available at: <https://journal.ab-club.ru/articles/vse-fakty-o-zetta-pervom-serijnom-elektromobile-iz-rossii/>. (accessed 28 December 2021)
38. Main news of Kazakhstan: Official page of the Internet edition tengrinews.kz. Available at: <https://informburo.kz/special/teperi-na-elektricheskoy-tyage-kak-v-too-saryarkaavtoprom-proizvodyat-avtobusy.html>; <https://tengrinews.kz/tag/electric-cars/> (accessed 28 December 2021)

Электромобильный и гибридный транспорт: силовые схемы, оборудование, проблемы и перспективы развития / Е.З. Амангалиев, А.С. Сарваров, В.И. Косматов, М.Ю. Петушков, Е.Я. Омельченко // *Электротехнические системы и комплексы*. 2022. № 1(54). С. 19-28. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1\(54\)-19-28](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1(54)-19-28)

Amangaliev E.Z., Sarvarov A.S., Kosmatov V.I., Petushkov M.Yu., Omelchenko E.Ya. Electric and Hybrid Transport. Power Circuits, Equipment, Problems and Development Prospects. *Electrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 1(54), pp. 19-28. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1\(54\)-19-28](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1(54)-19-28)