

Полноприводная и дорожная специальная техника "Урал" была представлена в рамках IV Межрегионального производственного форума "Производительность труда, кооперации и индустриализация". Форум проходил 13 декабря в Челябинске.

На форуме была показана всепогодная комбинированная дорожная машина ВМКД-2015 на новом дорожном шасси "Урал Некст 6×4". Специальное универсальное навесное оборудование разработано компанией ООО "Завод СпецАгрегат" совместно с АО "УралАвтодор" и произведено ООО "Завод СпецАгрегат". ВМКД-2015 предназначена для очистки дорожного полотна и обочины от снега, срезания льда и распределения противогололедных материалов в зимнее время, а также мойки, подметания и обеспыливания дорог и обочин в летнее время.

Накануне форума состоялось испытание новой КДМ на федеральной трассе. Под управлением водителя компании "УралАвтодор" тестируемая машина эффективно справилась с очисткой

дорожного полотна и обочин от снега, срезанием льда и распределением противогололедных материалов. Данный автомобиль будет поставлен в одну из ведущих дорожно-строительных компаний ОАО "Новосибирскавтодор".

"Дорожные" шасси автозавод "Урал" производит с конца 2018 года. Они могут использоваться как на дорогах общего пользования, так и на технологических. Ряд специальной техники на шасси "Некст 6×4" непрерывно расширяется и пополняется. Новые образцы спецтехники, созданные совместно с партнерами — заводами-изготовителями спецтехники технологичны, функционально эффективны, экономически выгодны.

Второй экспонат — аэродромный пусковой агрегат АПА-5-СА на полноприводном шасси "Урал Некст 6×6", предназначенный для одиночного или группового электростартерного пуска авиационных двигателей летательных аппаратов, питания бортовой электроаппаратуры летательных аппаратов в наземных условиях, а также для буксировки летательных аппаратов к месту сто-

янки и обслуживания. Для полноприводного семейства "Урал Некст" это первый выход на поля аэродромов.

Одним из важнейших вопросов челябинского Форума стала региональная и межрегиональная кооперация. По словам руководства "УралАвтодора", благодаря форуму компания получила возможность сообщать местным производителям техники, спецтехники и навесного оборудования о своих потребностях.



КОНСТРУКЦИИ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

УДК 338.45.01

ПРОБЛЕМЫ ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ ПРИ СОЗДАНИИ ТЯГОВО-ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С МЕХАТРОННЫМИ МОДУЛЯМИ

Д-ра техн. наук БЕЛОУСОВ Б.Н., КЕЛЛЕР А.В., ХАРИТОНЧИК С.В.,
БАХМУТОВ С.В.; канд. техн. наук БЕРДНИКОВ А.А.

НАМИ, БНТУ, ВА РВСН имени Петра Великого (belousovbn@yandex.ru)

Излагаются взгляды авторов на современное развитие автомобилестроения. Проведён краткий анализ основных технических тенденций мирового автомобилестроения на примере тяжёлых автопоездов, на базе которых возможно строить техническую политику их развития, в том числе и многозвенных, для важнейших отраслей экономики страны. Отмечается, что главным направлением развития мирового автомобилестроения является внедрение в конструкцию мехатронных систем и модулей. На основе достижений мехатроники и электромеханики авторами предлагается модульный принцип создания автопоезда.

Ключевые слова: автомобиль будущего, тяжёлый автопоезд, транспортная мехатроника, модуль, система, модульный принцип.

Belousov B.N., Keller A.V., Kharitonchik S.V., Bakhmutov S.V., Berdnikov A.A. PROBLEMS OF APPLIED MECHANICS WHEN CREATING VEHICLES WITH MECHATRONIC MODULES

The article presents the views of the authors on the modern development of automotive. A brief analysis of the main technical trends of the global automotive industry on the example of heavy road trains, on the basis of which it is possible to build a technical policy for their development, including multilink, for the most important sectors of the country's economy has been carried out. It is noted that the main direction in the development of the global automotive industry is the introduction of mechatronic systems and modules into the design. Based on the achievements of mechatronics and electromechanics, the authors propose a modular principle of creating a train.

Keywords: car of the future, heavy road train, transport mechatronics, module, system, modular principle.

В начале 2000-х гг. на страницах многих журналов развернулась дискуссия инженеров о том, с каким автомобилем мир войдёт в XXII век. В ходе дискуссии были выделены

три группы основных факторов, которые могут повлиять на конструкцию автомобилей в будущем [1]. Эти группы: политические (координация законодательства, техно-

лирование и создание единого экономического пространства и т. п.); экономические (топливный резерв и инфраструктура его использования, уровень и распределение благосостояния, степень урбанизации или субурбанизации; соотношение применимость/стоимость имеющихся технологий, включая технологии, связанные с безопасностью транспорта и т. п.); группа социальных факторов (модели поведения людей, способы проведения досуга, стоимость машин и топлива, проблемы окружающей среды, в той мере, как их воспринимает общество, общественные нормы, принятые по отношению к транспортным средствам и т. п.).

Глубокое изучение всех аспектов, высказанных в ходе дискуссии, позволило сформулировать главную проблему, имеющую свои внешние и внутренние противоречия. А именно: перед современным автостроением стоит глобальная проблема — создание транспортного средства будущего [2—10]. Точнее говоря — тягово-транспортного средства (ТТС), под которым подразумеваются и автомобиль, и автопоезд, и трактор. К внешним противоречиям относится необходимость выполнения требований, оформленных законодательно, к активной и экологической безопасности ТТС, как одному из самых

массовых объектов, используемых обществом в настоящее время. Способность ТТС обеспечивать существующие и перспективные требования по активной и экологической безопасности является главным условием, определяющим все остальные потребительские свойства автомобиля и трактора и тем самым его конкурентоспособность. Причём требования эти имеют устойчивую тенденцию к ужесточению. К тому же следует заметить, что сформулированная проблема носит междисциплинарный характер и охватывает практически все стороны жизнедеятельности человека.

Таким образом, перед мировым автомобилестроением стоят задачи, которые традиционными для них методами и техническими решениями выполнить невозможно. Нужны принципиально новые технические решения, обеспечивающие выполнение текущих и перспективных запросов общества. Но разработать такие решения невозможно, так как нет соответствующих научных положений, закономерностей и принципов прикладной науки — теории автомобиля, трактора, особенно для автопоездов. В этом заключается внутреннее противоречие обозначенной выше глобальной проблемы [4—5].

В настоящее время в мировом автомобилестроении идёт процесс, который условно можно назвать "генетической мутацией" конструкции наземных ТТС, качественного изменения их структуры и состава основных силовых устройств, интеграция электронных, электрических, гидравлических, пневматических и механических элементов и существенное повышение роли электроники и систем управления, т. е. широкое внедрение мехатронных систем и модулей в конструкцию автомобиля [10—17].

Понятие мехатроники как науки, используемое в данной статье, иллюстрирует рис. 1.

Мехатронный модуль — это функционально и конструктивно самостоятельное изделие для реализации движений со взаимопроникновением и единой аппаратно-программной интеграцией составляющих его элементов, имеющих различную физическую природу [6, 10]. Таким образом, транспортная мехатрони-



Рис. 1. Физическая суть мехатроники как науки

ка — это синтез электромеханики и микроэлектроники, объединённых общим управлением и оптимизированных по общесистемным критериям. Мехатроника начала своё внедрение в конструкцию транспортных средств с наиболее простого — с внедрения функциональных компонентов управляемых систем. Прежде всего, это были сенсоры и датчики, затем приводы. Следующий этап — симбиоз мехатроники и механических, а также гидравлических, электромеханических и других систем транспортных средств. Этот процесс идёт уже полным ходом и вызван он, прежде всего, постоянным ужесточением законодательных требований по активной и экологической безопасности. Данный этап можно характеризовать как переход от основанного на декомпозиции модульного построения технических систем к системно оптимизированным единым структурам ТС.

Процесс начался с проникновения отдельных компонентов в конструкцию ТС, а затем слияния их в единую структуру, реализующую функциональные компоненты в единой целевой функции подобно мультиагентным системам в компьютерных сетях. Эта тенденция распространяется далее и на силовые компоненты. Первым примером внедрения мехатронных компонентов в конструкцию автомобиля можно считать тормозную систему, которая, постоянно совершенствуясь, в настоящее время уже представляет собой мехатронную систему.

С учётом направлений развития автомобильной энергетики можно говорить о создании бортовых энер-

гетических комплексов (БЭК) ТТС. Они представляют собой как единичные энергоустановки (как правило, дизели), так и комбинацию из энергоустановок, работающих на разных физических принципах (например, электрогенератор, электрохимический генератор, гидростанция, накопительная батарея и т. п.) и имеющие разнесённые системы управления, которые объединяются в общую бортовую информационно-управляющую систему (БИУС). Таким образом, БЭК в конструкции автопоезда представляют собой симбиоз мехатронных модулей, в которых отдельные элементы самостоятельно работать не могут. Например, дизель — без системы управления подачи топлива, тяговый электрогенератор — без блока регулирования, защиты и управления (БРЗУ) и двигателя внутреннего сгорания.

Основной недостаток существующих и модернизируемых бортовых энергетических комплексов — недостаточная мощность, которая выражается в низкой удельной мощности (не более 6,5—7,0 л.с./т) применяемых энергоустановок в объекте. БЭК с тепловыми машинами представлены в основном дизель-генераторными установками, КПД которых определяется циклом Карно. Многочисленными работами доказано, что существующий комплекс требований может быть здесь выполнен при использовании нетрадиционных технических решений с мехатронными модулями.

Анализ возможных вариантов БЭК показывает, что в качестве приоритетного на данном этапе разви-

тия техники можно рассматривать создание комбинированных энергоустановок для каждого звена, состоящих, по меньшей мере, из двух источников: источника энергии и буферного источника мощности. Это позволяет совместить их положительные свойства и получить недостижимые для установок с моноэнергетическими источниками совокупные характеристики.

В системах современных ТТС могут использоваться электропривод, следящий гидропривод и комбинация устройств передачи силового потока.

Под термином "гидропривод" понимается совокупность устройств, предназначенных для передачи и преобразования механической энергии посредством потока жидкости для приведения в движение исполнительных органов (например, колёсного двигателя и др.) и управления этим движением. Под следящим приводом понимается регулируемый гидропривод, в котором величина перемещения выходного звена пропорциональна величине задающего воздействия. Это гидропривод, в котором выходное звено повторяет (точно или пропорционально) движения, заданные звеном управления.

Под термином "Электропривод" понимается электромеханическая система, состоящая в общем случае из преобразователей электроэнергии, электромеханических и механических преобразователей, управляющих и информационных устройств и устройств сопряжения с внешними электрическими, механическими, управляющими и информационными системами, предназначенными для приведения в движение исполнительных органов (например, опять же колёсного двигателя и др.) и управления этим движением.

В тяговом электроприводе ограничиваются максимальный момент и мощность на валу привода. Ограничение максимального момента связано в первую очередь с требованиями, определяемыми механической прочностью и силовой электроникой; ограничение гиперболой мощности определяется мощностью бортовых источников (ДВС, буферного накопителя).

В режиме торможения происходит рекуперация, т.е. возврат кинетической энергии движения транспортного средства. Рекуперированная энергия может поступать в буферный накопитель или сбрасываться в тормозной резистор. Возможен также "сброс" энергии торможения в ДВС через обратимый мотор-генератор, при этом топливо в ДВС не подаётся.

В основном диапазоне мощностей 20—70 кВт наибольшее развитие получили асинхронный электропривод и электропривод с синхронным двигателем на основе постоянных магнитов. Имеются (не очень удачные) примеры использования вентильно-индукторного привода. Из перспективных типов электродвигателей отметим также синхронно-реактивный. Асинхронный электропривод характеризуется наилучшим соотношением цена/качество. Синхронный с постоянными магнитами имеет некоторое преимущество в КПД, но стоит дороже. В асинхронном режиме работа с ограничением мощности обеспечивается при ограничении напряжения питания двигателя за счёт соответствующего ослабления поля. В синхронном приводе с постоянными магнитами поле практически не регулируется, что приводит к необходимости превышения установленной мощности преобразователя в 3—10 раз. Для приводов лёгких транспортных средств это приемлемо; для средних и тяжёлых транспортных средств это приводит к недопустимому удорожанию системы привода.

В тяговом электроприводе появляется возможность существенного снижения массы тяговых двигателей практически без снижения их КПД. Вопросы оптимизации электродвигателей для транспортного применения далеко не тривиальны, они связаны не только с оптимизацией самого двигателя, но и с его охлаждением, конструкцией, выбором режимов его работы во всех областях частот вращения и нагрузок.

Для функционирования системы привода необходимо использование качественной системы управления — частотной или векторной. Такая система должна обеспечивать оптимальный по потерям режим работы двигателей во всех диапазонах час-

тот вращения, электромагнитных моментов, скольжений, индукций и т. п. Однако для тяговых приводов необходимо также учитывать критерий максимального использования имеющихся ресурсов, прежде всего максимальных напряжения питания и тока, которые ограничиваются установленной мощностью силового преобразователя. Требуется, чтобы асинхронный тяговый двигатель мог бы реализовать максимально возможные значения момента, пусть даже и не в режиме максимального КПД, если при данном моменте оптимальный по КПД режим невозможно реализовать при данных ограничениях напряжения и тока.

Альтернативой электромеханической трансмиссии являются гидравлические различных типов. Сравнительные показатели трансмиссий, применяемых в сельскохозяйственных тракторах, приведены в таблице. В совокупности, все эти факторы однозначно свидетельствуют в пользу применения более простой конструктивно, более надёжной, не требующей больших эксплуатационных затрат, имеющей больший ресурс и, следовательно, более перспективной электромеханической трансмиссии.

Рассмотрим кратко основные принципы исследования и проектирования компонентов активного автопоезда, справедливых и для однозвенного ТТС, на примере электромеханической трансмиссии.

Мотор-генератор

Типовая область скоростей и моментов мотор-генераторов, работающих совместно в области рабочих режимов ДВС, оптимальных по топливной эффективности и выбросам, характеризуется тем, что максимальный момент реализуется на максимальной частоте вращения. Таким образом, режимы работы электродвигателя в тяговых приводах и в генераторах существенно различаются, что требует соответственного различия в методиках их проектирования.

Система "электрическая машина—механический редуктор"

Обычно мощности, моменты и частоты вращения выходных (для

тягового двигателя) и входных (для мотор-генератора) валов являются заданными, как правило, известны и желаемые КПД и габариты системы "электродвигатель—редуктор", а также их максимальная масса. Удельные характеристики электродвигателей и редукторов, которые определяются параметрами применяемых материалов и технологий изготовления, существенно различаются. Редукторы, как правило, характеризуются более высокими отношениями удельной массы к передаваемому моменту по сравнению с электродвигателями. Соответствующие показатели, казалось бы, однозначно свидетельствуют в пользу механических редукторов, как по удельному моменту, так и по КПД или потерям. Широко распространено мнение, что выбор редуктора с максимальным коэффициентом передачи и, соответствен-

но, использование электрической машины с максимальной частотой вращения позволяет снизить массу системы "электродвигатель—редуктор". Для обычных электродвигателей это, в целом, справедливо: снижение момента при фиксированном числе пар полюсов позволяет использовать двигатель меньшей массы. Однако для оптимизированных тяговых электродвигателей это не так. Масса оптимизированного двигателя определяется его мощностью и незначительно зависит от частоты вращения. Отсюда следует, что целесообразно исключить механический редуктор, который только увеличивает массу и стоимость системы. Использовать редуктор целесообразно лишь в случае, если габаритные ограничения нарушаются. Приведённый момент инерции вращающихся масс электродвигателя при этом не меняется.

Система "электрическая машина—коробка передач"

Использование коробки передач позволяет снизить как массу, так и габариты тягового двигателя. Отметим, что следует принять во внимание совокупные характеристики электромеханической системы "двигатель—коробка передач", с точки зрения их общей массы и габаритов, а также стоимости, ресурса и других показателей.

Эффективность применения коробки передач тем выше, чем больше отношение максимального электромагнитного момента к моменту, развиваемому на максимальной частоте вращения. Предельное относительное снижение массы двигателя за счёт использования коробки передач можно оценить величиной $M_{\max} N_{\max} / 2P_{\max}$. Соответствующее минимальное число ступеней передач оценивается величиной, равной

Характеристика	Сравнительные показатели трансмиссий		
	Электромеханическая	Гидромеханическая	Гидрообъёмная
Экономичность	КПД до 90 % и мало зависит от скорости движения и нагрузки	КПД около 80 % и сильно зависит от скорости движения и нагрузки	КПД около 80 % и мало зависит от скорости движения и нагрузки
Техническое обслуживание	Обслуживание минимально (контроль охлаждающей жидкости, сопротивления утечки)	Замена масла и фильтров. Опасно загрязнение масла	Замена масла и фильтров. Загрязнение масла критично
Чувствительность к окружающей температуре	Прогрев не требуется. Контроль за перегревом электрических машин и силовой электроники при повышенной температуре	При качественном масле перегрев не опасен. Требуется прогрев, возможна аварийная ситуация	При качественном масле перегрев не опасен. Требуется прогрев, возможна аварийная ситуация
Ремонт-пригодность	Ремонт только быстрой заменой блоков. Быстрый, без разборки узлов. Стоимость определяется стоимостью заменяемых блоков	Ремонт возможен с разборкой узлов	Ремонт только заменой блоков. Быстрый, но несколько дешевле, чем электромеханика
Совместная работа с дизелем (ДВС)	ДВС при всех нагрузках и скоростях работает в оптимальном режиме, что экономит топливо	С изменением нагрузки и скорости изменяется нагрузка на ДВС	ДВС при всех нагрузках и скоростях работает в оптимальном режиме, что экономит топливо
Опасные факторы	Высокое напряжение в закрытых электрических машинах и силовой электронике	Не отмечено	Высокое давление жидкости — 400 атм.
Оптимальность тяговой характеристики	Оптимальна для любых машин из-за реализации регулирования и стабилизации момента и скорости	Для сельскохозяйственных тракторов не оптимальна: скорость движения зависит от нагрузки	Оптимальна для любых машин, возможна работа в режиме "автомат" и с фиксированным передаточным числом
Компонуемость	Свободная компоновка приводных машин даёт хорошую развесовку	Жёсткая связь между узлами ограничивает свободу компоновки	Свободная компоновка приводных машин даёт хорошую развесовку
Степень готовности	Разработки, опытная эксплуатация	Серийное производство	Серийное производство компонентов
Ориентировочная стоимость	Электротрансмиссия дороже гидромеханической и примерно на 10 % дороже гидрообъёмной. С уменьшением цен на силовую и управляющую электронику цены сравниваются, а возможно, будут меньше. Малые эксплуатационные затраты	Наиболее дешёвая в условиях крупносерийного производства. Значительные эксплуатационные затраты	Трансмиссия дороже гидромеханической примерно на 20 %. Значительные эксплуатационные затраты

логарифму по основанию 2 от отношения $M_{\max} N_{\max} / P_{\max}$, с округлением до ближайшего большего целого значения. Реальная эффективность применения коробки передач несколько меньше. Использование коробки передач в тяговом электроприводе увеличивает момент инерции вращающихся масс на низших передачах и снижает момент инерции на высших передачах.

Система "электрическая машина—силовой преобразователь"

Наиболее перспективный промышленный тип силового преобразователя для питания тяговых двигателей в транспортных средствах — автономный инвертор напряжения, работающий в режиме высокочастотной широтно-импульсной модуляции. Инерционность нагрузки позволяет фильтровать высокочастотную составляющую выходного напряжения.

В тяговом приводе важно снижение стоимости комплектного оборудования при обеспечении требуемых тяговых характеристик. Стоимость силового преобразователя, которая составляет основную часть стоимости тягового привода, определяется ценой силовых приборов, пропорциональной установленной мощности преобразователя. Установленная мощность тягового двигателя равна произведению максимального электромагнитного момента на максимальную частоту вращения; значение гиперболы мощности, ограничивающей область реализуемых моментов и часто понимаемое как мощность тягового двигателя, обычно существенно меньше, чем значение установленной мощности ЭД. Возникает вопрос, какому из этих двух значений должна соответствовать установленная мощность силового преобразователя? При использовании асинхронного двигателя ближе к истине второе утверждение, что позволяет существенно снизить стоимость силового преобразователя.

В генераторах максимальный момент развивается на максимальной частоте вращения, и установленная мощность генератора совпадает с максимальной мощностью силового преобразователя. Это ещё раз демонстрирует различия в проекти-

ровании тяговых электроприводов и генераторов. Отметим, что целесообразно использование силовых преобразователей в интегральном, транспортном исполнении.

Режимы работы ДВС в гибридной схеме

С точки зрения повышения топливной эффективности желательно, чтобы рабочие режимы лежали в области многопараметровой характеристики ДВС с минимальным удельным расходом топлива. Снижение потребления топлива при использовании оптимального по топливной эффективности режима может быть существенным, на максимальной мощности до 30 % и более, по сравнению с обычно используемой частотой вращения ДВС.

Особо следует рассмотреть режим работы системы ДВС—мотор—генератор в различных кинематических схемах гибридных транспортных средств.

В системах с электромеханической трансмиссией, без буферного накопителя мотор-генератор должен обеспечивать требуемую по условиям движения мощность. Это означает, что момент мотор-генератора, являющегося нагрузкой ДВС, будет зависеть от частоты вращения. В системе с буферным накопителем и в системе с обычной трансмиссией момент нагрузки ДВС при превышении скорости вращения повышается, при снижении скорости — снижается, что, очевидно, повышает устойчивость работы ДВС. В системе с электромеханической трансмиссией ситуация противоположная. Как следствие, условия устойчивой работы ДВС в такой системе отличаются от систем с традиционной трансмиссией, что требует разработки специальных алгоритмов управления ДВС.

Буферные накопители

Требования к накопителям в конкретных применениях весьма различаются. Например, в некоторых случаях критическим параметром является мощность, а количество запасаемой энергии не важно; в других применениях критическим параметром является энергоёмкость. Есть отличия и в числе циклов за время

работы энергоустановки; различаются требования по надёжности, устойчивости к перегрузкам и т. д., что обуславливает целесообразность выбора того или иного типа накопителя для конкретного применения.

Варианты буферных накопителей: супермаховик; аккумуляторная батарея; суперконденсатор. В гидроприводе для этих целей используются гидроаккумуляторы. Различные по конструкции (поршневые, баллонные, мембранные, силиконовые) и назначению гидроаккумуляторы позволяют получить решения для многих задач. Возможна также комбинация отдельных накопителей (гибридный накопитель). Среди гибридных накопителей отметим совместное использование аккумуляторной батареи и суперконденсатора, что позволяет повысить как удельную энергоёмкость, так и мощность такой системы.

У аккумуляторных батарей имеются следующие недостатки: характеристики разряда снижаются при большой мощности; число циклов существенно зависит от мощности (при большой мощности разряда необходима частая замена батарей); плохо функционируют при низкой температуре; трудность заряда при рекуперации; небезопасны, особенно при полном заряде или разряде.

Суперконденсаторы характеризуются следующим: выдерживают миллионы циклов; плотность мощности примерно на два порядка выше; работают в широком температурном диапазоне; недостаточно энергоёмки.

Учитывая всю совокупность факторов, определяющих выбор накопителя, прежде всего климатическое исполнение и ресурс (эксплуатация без замены накопителя), для реализации рекомендуются промышленно выпускаемые суперконденсаторы и литий-ионные аккумуляторные батареи.

Синтез управления комплектным тягово-энергетическим оборудованием

Комплект приводов звеньев автопоезда, ДВС, буферный накопитель и трансмиссия как объект управления представляют собой сложную взаимосвязанную нелинейную динамическую систему. В такой систе-

ме должен выполняться ряд ограничений на управления и переменные состояния: ограничение напряжений питания двигателей, токов, моментов, частот вращения, диапазонов изменения напряжения звена постоянного тока. Очевидно, необходима разработка специальных алгоритмов, обеспечивающих автономную работу отдельных устройств и устойчивое согласованное управление всеми устройствами, включая ДВС каждого звена и степенями свободы сцепного устройства. Существенным фактором является неопределённость исходных параметров движения: требуемая тяговая мощность заранее не известна, она определяется текущими условиями движения и желаниями водителя; имеющийся резерв мощности также заранее не известен или известен недостаточно точно (максимальная мощность ДВС зависит от многих факторов, таких как качество топлива, атмосферное давление и влажность воздуха, температура, наконец, состояние ДВС и др.). Изменяется также уровень потерь и КПД тягово-энергетического оборудования, изменяется мощность вспомогательных бортовых устройств. В этих условиях необходимо обеспечить баланс мощностей автоматически, не требуя точных данных о состоянии и режиме работы устройств [11, 13–15].

Управление многодвигательными системами тяги

Логика развития транспортных средств с электромеханической трансмиссией (гибридных) неизбежно приведёт к исключению дифференциала и традиционной кинематической передачи, характерной для использования центрального привода. Замена механического дифференциала на электрический позволяет реализовать любое желаемое распределение момента как между колёсами разноименных бортов, так и между ведущими мостами, любое желаемое различие между скоростями их вращения, в том числе с учётом функции руля при поворотах транспортного средства, а также между скоростями ведущих и ведомых колёс (управляемое буксование). При этом механическая передача существенно упрощается, и

сводится, как правило, к планетарному (возможно, многоступенчатому) редуктору.

В транспортных средствах с индивидуальным приводом колёс (по схеме мотор—колесо или мотор—ось) желательно иметь датчики скорости движения ведомых колёс, и/или датчик скорости движения транспортного средства, что позволит реализовать управляемое буксование. Задание момента (тягового усилия) может формироваться не педалью, а регулятором скорости движения, что не меняет суть вопроса.

Вспомогательные системы — не выполняют непосредственно основных функций (обеспечения движения гибридного транспортного средства), однако без выполняемых ими обеспечивающих функций работа основного оборудования невозможна. Кроме того, необходимо обеспечить контроль, диагностику и поиск неисправностей, по возможности сократив время, требуемое для восстановления системы.

К вспомогательным системам относятся: источники питания электронного оборудования; устройства систем охлаждения; коммутирующие устройства; информационное табло в кабине водителя; сервисная вычислительная система.

Несмотря на вспомогательные функции к источникам питания компонентов предъявляются очень жёсткие требования по надёжности, эффективности, массово-габаритным показателям, стоимости. Не менее сложной является задача создания эффективных, компактных и надёжных систем охлаждения компонентов — электрических машин, силовой электроники. Комплектное оборудование гибридного транспортного средства является сложной системой. При всей его сложности алгоритмы управления оборудованием, управления движением должны быть направлены на упрощение управления.

Для сопровождения, наладки и диагностики ошибок в сложной системе оборудования необходима разработка специальной сервисной вычислительной системы, которая предназначена для визуализации параметров рабочих характеристик; предоставления и обработки графической информации; загрузки, сохранения и отображения в графической и табличной форме переменных всех компонентов, запись, сохранение и последующее отображение аварийных логов ("чёрный ящик"). Сервисная вычислительная система должна в значительной мере упростить процесс наладки и контроля, а также ускорить поиск и устранение неисправностей.

Проектированием немеханической части (электронной, электрической, гидравлической, пневматической и др.) систем тягово-транспортных средств занимаются специалисты из соответствующих областей знаний. Однако применительно к объекту, т. е. к ТТС, основные технические требования и принципы, методологию применения в конструкции, например, автомобилей, гибридных систем, как систем мехатронных модулей, формируют автомобильисты-механики. В этом уже накоплен огромный опыт проектирования, который требует обобщения и осмысления.

Основной недостаток работ, проводимых в области создания ТТС с электротрансмиссией, — это отсутствие комплексной системной проработки автомобильной электроэнергетической системы и системы автоматического (автоматизированного) управления движением. При этом одним из наиболее существенных недостатков является отсутствие проработок (даже теоретических) и рекомендаций по созданию управляемой генерирующей установки (электрогенератор с регулятором напряжения) автомобильного типа, а также бортовой электрической сети (силовой и распределительной) с аппаратурой коммутации, защиты и управления.

Несмотря на то, что проблемы использования и разработки гибридных систем, в том числе и электротрансмиссии, как системы мехатронных модулей, в конструкции тягово-транспортных средств не являются новыми, до сих пор не обобщён имеющийся опыт и не решён ряд системных вопросов, как в части собственно проектирования электроэнергетического оборудования ТТС, так и в части разработки систем управления движением, в том числе роботизированных. Работы

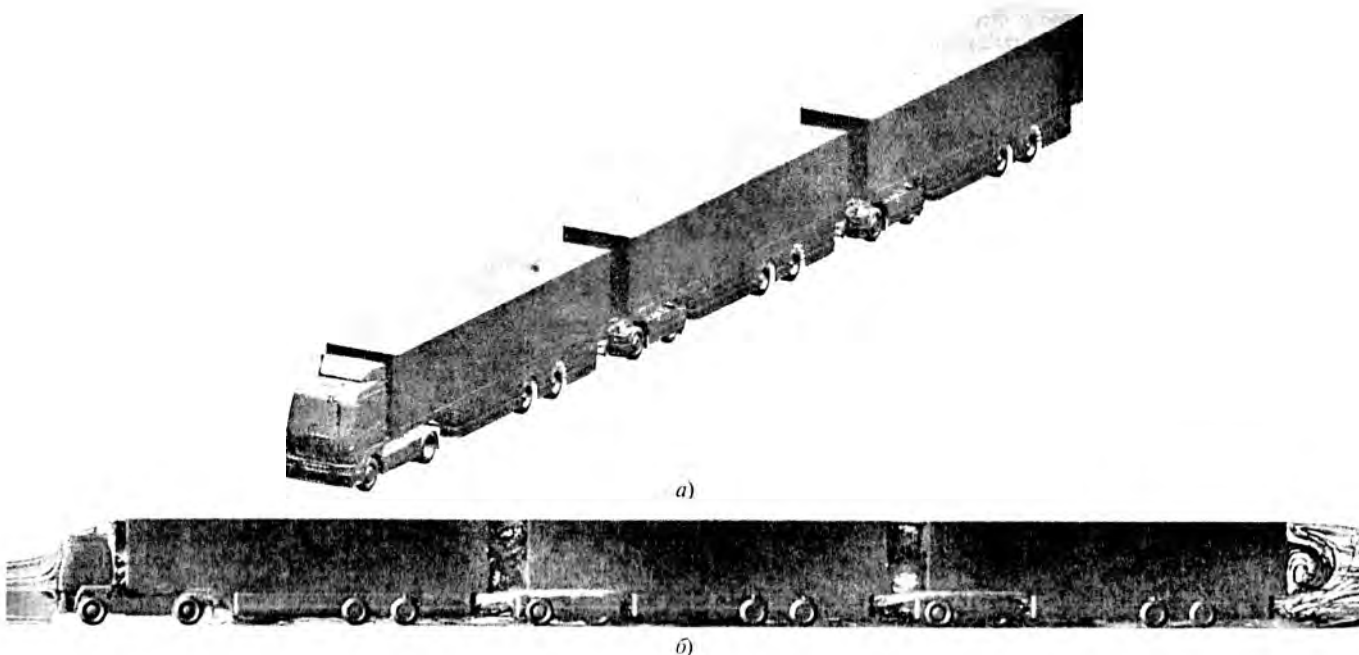


Рис. 2. Расчётная схема многоосевная автопоезда:
а — 3D-модель; б — схема внешнего аэродинамического воздействия

ведутся разрозненно и без единой программы. "Механическое" использование мехатронных модулей в конструкции автомобиля не прино-

сит ожидаемого эффекта. Автомобиль, особенно активный автопоезд, представляет собой сложный комплекс систем упругодеформируемых

твёрдых тел с наложенными негеломонными и нестационарными, в том числе трибологическими связями, активными упругодемпфирующими элементами, функционирующими при случайных возмущениях. Для полного представления такой системы при программировании различных контроллеров и блоков управления необходима комплексная математическая модель, позволяющая моделировать различные схемы взаимодействия всех систем ТТС, а также служащая основой "инженерного инструмента" для их проектирования. Поэтому актуальна разработка комплексной математической модели, позволяющей моделировать различные схемы взаимодействия всех систем активного автопоезда (рис. 2), в том числе с учётом контактного (трибологического) взаимодействия колеса с опорной поверхностью.

На базе этой модели (рис. 3) исследована работа таких гибридных подсистем автопоезда, как: ДВС—электрогенератор—электропривод с мотор-колесом, всеколесное рулевое управление с электрогидравлическим следящим приводом поворота колёс, а также регулируемая система поддрессоривания колёс, БИУС, система шина—опорная поверхность с учётом трибологических

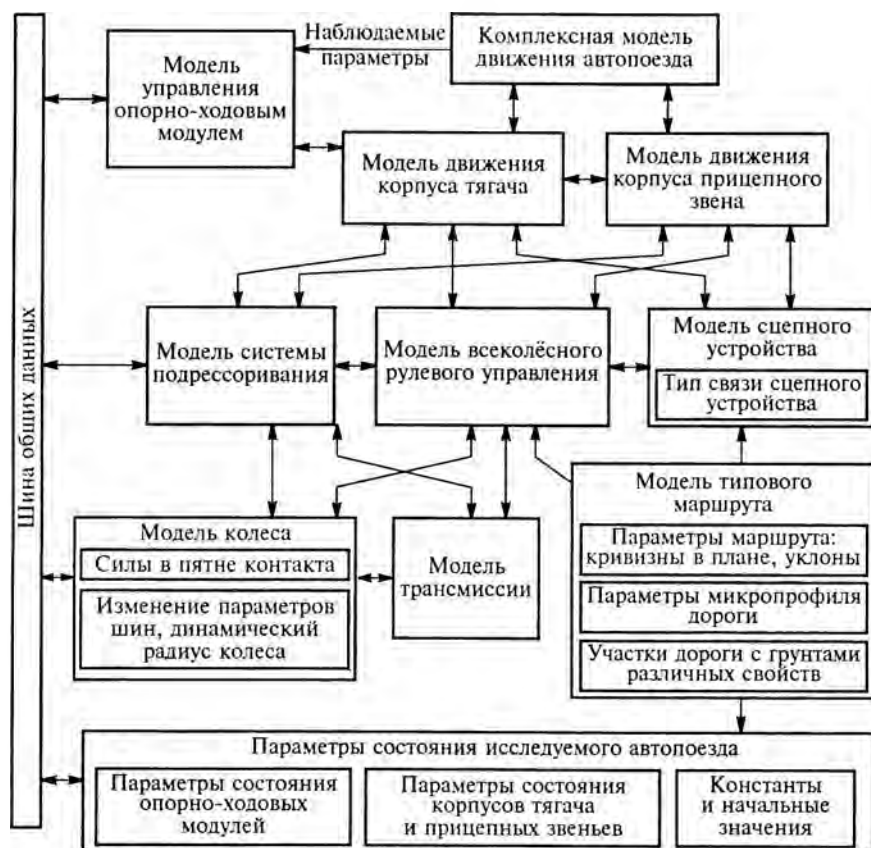


Рис. 3. Блок-схема математической модели

связей. По результатам исследований построен концептуальный облик активного магистрального многозвенного автопоезда (рис. 4).

Интересны примеры решения мехатронных модулей при построении БЭК на основе электрохимического генератора. На рис. 5 приведена типовая структура тягово-силового оборудования гибридного автомобиля с топливными элементами (по Д.Б. Изосимову). Силовая схема строится по последовательной

схеме: батарея топливных элементов — согласующий повышающий преобразователь постоянного тока — буферная аккумуляторная батарея — инвертор тягового привода — тяговый электродвигатель мотор-колёс. Батарея топливных элементов является основным источником энергии движения, её мощность достаточна для покрытия средней мощности, потребляемой тяговым приводом в цикле (или заданном режиме) движения. Согласующий повышающий

преобразователь постоянного тока служит для регулирования мощности, потребляемой от батареи топливных элементов (текущее значение средней потребляемой мощности может оказаться меньше, чем максимальная мощность батареи), и для заряда буферного источника, обеспечивающего пиковые потребления мощности (значения пиковой мощности, например, при разгоне, могут в несколько (три и более) раз превышать среднюю мощность

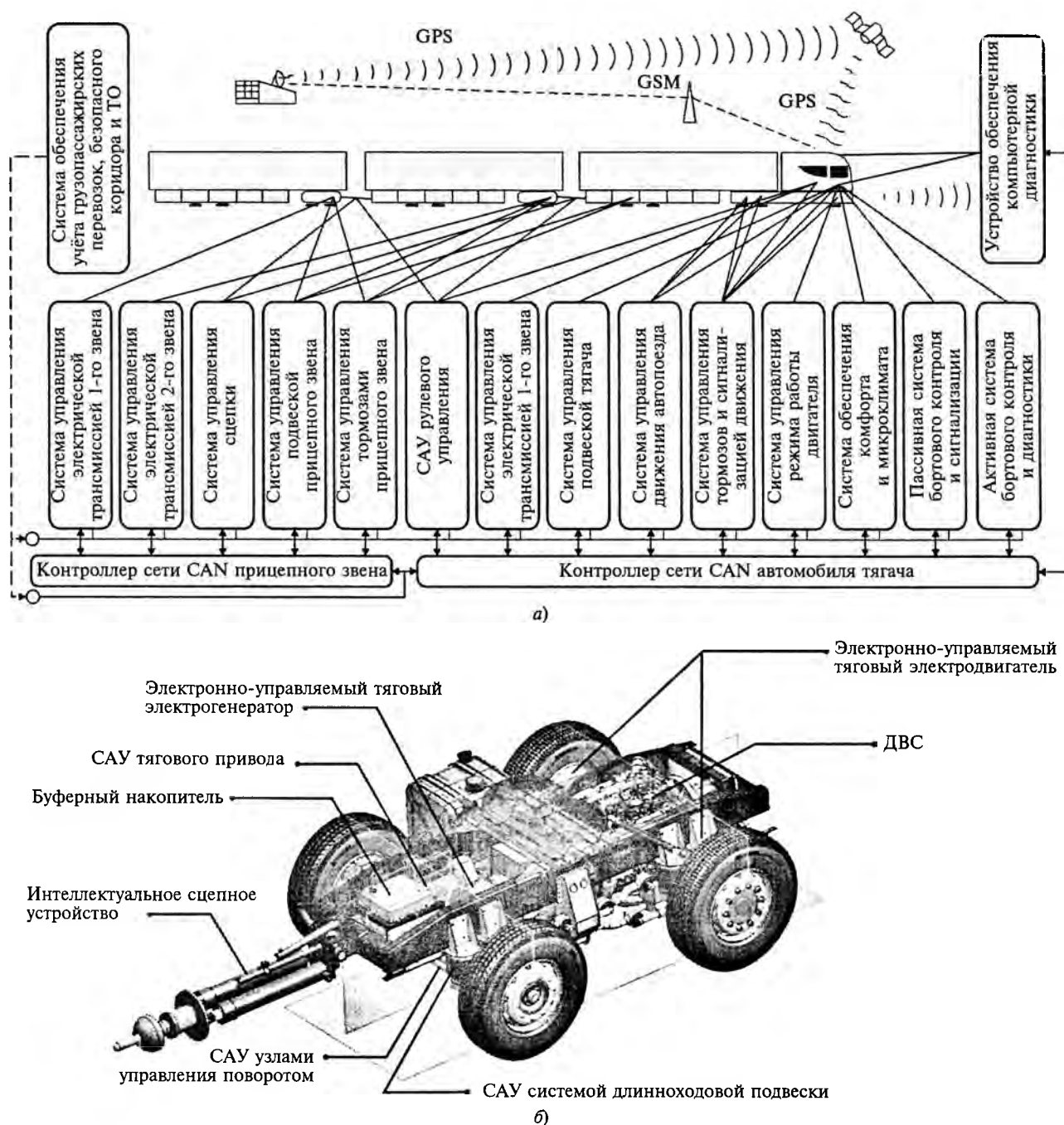


Рис. 4. Концептуальный облик многозвенного автопоезда:
а — общая схема концепции; б — базовая тележка звена

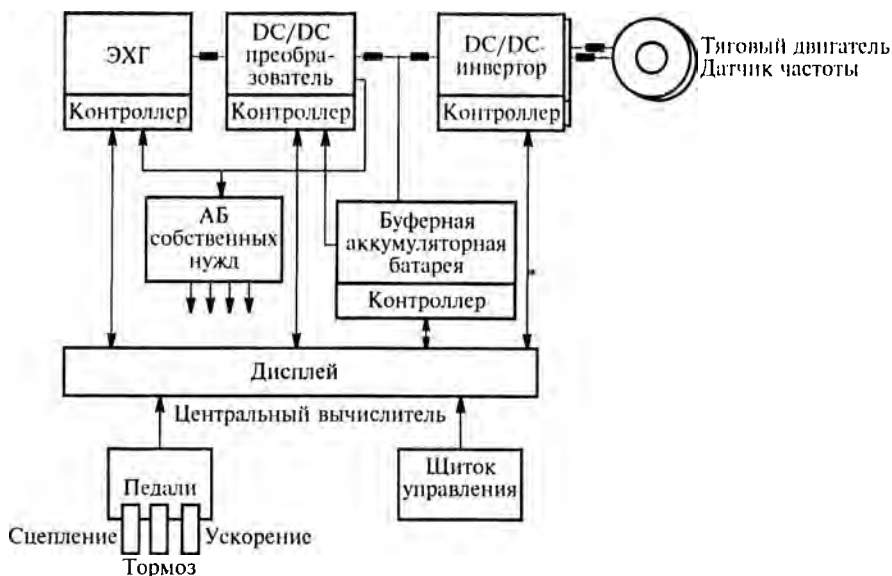


Рис. 5. Состав и структура энергетического и управляющего тягового оборудования

батареи топливных элементов). Одновременно буферный источник служит для приёма мощности, возвращаемой от тягового привода в режиме торможения транспортного средства. Инвертор преобразует постоянное напряжение буферной батареи в трёхфазное напряжение переменного тока, питающего тяговый двигатель (направление потока мощности может быть от батареи в двигатель в режиме тяги или обратным в режиме торможения).

Согласующий повышающий преобразователь постоянного тока, кроме заряда буферной батареи, должен обеспечивать питанием отдельные устройства (вспомогательные устройства батареи топливных элементов) и заряд аккумуляторной батареи собственных нужд (питание автомобильных устройств: освещение, сигналы и т. д.). От той же батареи собственных нужд необходимо осуществлять начальный запуск устройств (батареи топливных элементов).

В заключение можно сказать следующее. Анализ мировых тенденций развития наземных тягово-транспортных систем показывает, что совершенствование мобильной техники идёт в направлении энергосбережения, ресурсосбережения и создания машин с экологически безопасными параметрами. Основным фактором совершенствования машин в этих направлениях является использование новых техноло-

гий для создания техники с комбинированными энергоустановками и гибкими трансмиссиями на основе перспективных ДВС, использования альтернативных топлив, гидрообъёмного и электрического тяговых приводов колёсного движителя. Улучшение качества компонентов и транспортных средств требует разработки чёткой программы стандартизации. Необходима гармонизация отечественных стандартов с международными.

Размещение на одном образце тягово-транспортного средства большого числа систем и механизмов с использованием различных видов энергии приводит к необходимости создания основ общего подхода к проектированию подобных сложных систем. Применение электропривода, гидропривода, электроники, систем автоматического управления в конструкции активных автопоездов предъявляет жёсткие требования по основным показателям и определяет использование передовых достижений в области проектирования, материалов, технологий изготовления. Основным недостатком работ, проводимых в области создания ТТС с электротрансмиссией, в том числе и активных автопоездов, является отсутствие комплексной системной проработки автомобильной электроэнергетической системы и системы автоматического (автоматизированного) управления движением.

Литература

1. SAE Automotive Engineering International. January 2000. P. 42–48.
2. Харитончик С.В. Концепция и создание прототипа многосевого автопоезда с управляемыми активными звеньями для трансконтинентальных перевозок: дис. ... докт. техн. наук: 05.05.03. — Мн., 2012. 432 с.
3. Моделирование аэродинамики магистрального автопоезда / В.А. Бабенко, Т.А. Баранова, Ю.В. Жукова, А.Д. Чорный, С.В. Харитончик // Механика машин, механизмов и материалов. — 2010. — № 2. — С. 72–75.
4. Высоцкий М.С. Основы проектирования модульных магистральных автопоездов / М.С. Высоцкий, С.И. Кочетов, С.В. Харитончик. — Минск: Беларус. навука, 2011. — 392 с.
5. Златин П.А. Электромобили и гибридные автомобили / П.А. Златин, В.А. Кеменов, И.П. Ксеневич // Агроконсалт, Москва, 2004. — 413 с.
6. Дональд В. Эблесон, президент SAE. Разрабатываемые технологии электромобилей. Доклад на 1-м международном семинаре SAE-REVA "Проблемы и перспективы развития электромобильной техники". Москва, 25 августа 1999 г. Приводная техника. — 1999. — № 9/10. — С. 13–19.
7. Гибридные автомобили и их компоненты (обзор зарубежной печати). Мобильная техника. — 2003. — № 1, № 2, 3.
8. Ксеневич И.П. Технологии гибридных автомобилей: состояние и пути развития отечественной автомобильной техники с комбинированными энергоустановками / И.П. Ксеневич, А.А. Ипатов, Д.Б. Изосимов // Мобильная техника. — 2003. — № 2, 3.
9. Kateri Kallahan. EVs: Clean Driving into 21st Century. EVS-16, Beijing, China, Oct. 11–16, 1999. Opening Session Report.
10. Белоусов Б.Н. Колёсные транспортные средства особо большой грузоподъёмности. Конструкция. Теория. Расчёт / Б.Н. Белоусов, С.Д. Попов // Под общ. ред. Б.Н. Белоусова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. — 728 с.
11. Двигатели внутреннего сгорания и электродвигатели. Global Viewpoints, Japan. Automotive Engineering, August 2002. P. 35–43.
12. Ксеневич И.П. Механические трансмиссии с бесступенчатым регулированием передаточных чисел между смежными ступенями коробки передач. Мобильная техника. — 2004. — № 1. — С. 12–20.
13. Изосимов Д.Б. Критерии оптимизации и постановки задач сопоставления двигателей переменного тока для регулируемого привода / Д.Б. Изосимов, О.Г. Ключков // Приводная техника. — 1997. — № 5, 6.
14. Udo Winter, Siemens Automobiltechnik. Comparison of different drive system technologies for electric vehicles. EVS-15, Brussels, October 1–3, 1998. CD-ROM, Paper No. 294.
15. Изосимов Д.Б. Предварительная оптимизация размеров активных частей одного класса асинхронных электродвигателей для регулируемого привода / Д.Б. Изосимов, Е.М. Лопухина, А.Б. Захаренко — М.: Электричество. — 1996. — № 11.
16. Вопросы построения перспективного асинхронного тягового привода. Мобильная техника. — 2004. — № 1, 2, 3, 4.
17. Пинский Ф.И. Энергетические установки со свободнопоршневыми двигатель-генераторами. Мобильная техника. — 2004. — № 2.