

УДК 621.868.2-83.001.5

Обзор состояния и перспектив тягового электропривода автономного транспорта

М. А. Слепцов*, В. И. Нагайцев, В. Г. Комаров,
А. В. Банакин

Представлен обзор и проанализировано современное состояние использования тягового электропривода (ТЭП) на автономных транспортных средствах (АТС). Показано, что в основном ТЭП применяется в составе комбинированных энергосиловых установок автомобилей (КЭСУ), а также как основная энергосиловая установка на появляющихся в последнее время электромобилях. Применение гибридных энергоустановок требует включения накопителей энергии в виде электрохимических аккумуляторов или суперконденсаторов. Описаны различные способы заряда накопителей энергии от теплового двигателя, солнечных батарей или топливных элементов. Заряд накопителей также осуществляется от тягового преобразователя в режиме рекуперации энергии торможения. Наиболее перспективным на сегодня остается применение гибридных энергоустановок с тепловым двигателем. Рассмотрены показатели трех типов аккумуляторных батарей и возможности оптимизации энергоустановок. Продемонстрированы и сопоставлены функциональные схемы различных энергосиловых систем. Доказано, что в условиях отсутствия накопителей электроэнергии, удовлетворяющих по энергоемкости, массе, объему и стоимости, на АТС наиболее целесообразно использовать КЭСУ последовательного типа. Приведены разработки кафедры в создании транспортных средств с накопителями энергии на суперконденсаторах и с гибридной энергоустановкой на тепловом двигателе. Рассмотрены теоретические основы фазорного управления электрическими машинами, базирующегося на математическом описании их моделей с помощью интегральных функций комплексной переменной. Это позволит не только обобщить результаты анализа и моделирования процессов в различных электрических машинах, но и существенно упростить, и усовершенствовать способы их управления. Представлены пример имитационного моделирования тяговой асинхронной машины в цикле движения транспортного средства на стандартном перегоне и осциллограммы полученных результатов. По мере увеличения энергоемкости и удельной мощности накопителей возможна оптимизация энергоустановки с уменьшением установленной мощности теплового двигателя.

Ключевые слова: тяговый электропривод (ТЭП), комбинированная энергосиловая установка (КЭСУ), автономное транспортное средство (АТС), тяговый электродвигатель (ТЭД), накопитель энергии, фазорное управление, имитационное моделирование.

* SleptsovMA@mpei.ru

Введение

Энергосиловая установка большинства современных автомобилей построена на базе теплового двигателя внутреннего сгорания. По прогнозам [1] количество автономных транспортных средств (АТС) увеличивается значительно интенсивнее, чем происходит прирост населения: за последующие 50 лет ожидается увеличение населения мира от существующего на сегодня числа 6 млрд до примерно 10 млрд человек, а количество АТС, находящихся в эксплуатации, должно увеличиться от 700 млн до 2,5 млрд единиц. Увеличение числа АТС, использующих тепловые двигатели, вызывает опасение, что в течение ближайших 50-ти лет будут исчерпаны запасы органического топлива [2]. Мало того, существует мнение [3], что общий объем выбросов транспортом парниковых газов приведет к глобальному потеплению. Подобные крайне негативные высказывания по поводу глобального потепления и скорого исчерпания запасов органического топлива следует расценивать как конкурентную информационную политику, а не как объективную оценку. Фактически количественные данные либо скрываются, либо намеренно фальсифицируются. Лишь по результатам исследований, проводимых ежегодно и иногда публикуемым [4] Международной финансовой корпорацией Всемирного банка (МФК ВБ) удалось установить, что в текущем году на мировую транспортную систему приходится не более 35% конечного потребления энергоресурсов. Причем, внутри транспортного сектора, включающего все виды транспорта, автомобильный потребляет не более 50% энергоресурсов, т.е. АТС потребляют не более 20% от общего конечного потребления органического топлива и с ними не связаны проблемы глобального потепления и исчерпания топлива, если они вообще существуют.

Нет сомнений, что экологическая проблема с ростом числа АТС все более обостряется. Автомобиль стал не переменным атрибутом, так же широко распространенным, как мобильный телефон. АТС всегда требуется иметь рядом и они сосредоточены в зоне обитания населения. Выхлопные газы не столько отравляют общую атмосферу планеты, сколько ухудшают экологическую обстановку в зоне обитания людей, животных и растений, в непосредственной близости.

Для снижения вредного влияния выхлопов тепловых двигателей АТС принимают многочисленные меры: снижают токсичность самого органического топлива, применяют фильтры в глушителях, повышают экономичность двигателей внутреннего сгорания и т.п. Но все эти меры уже исчерпаны. Остается только уменьшить время работы теплового двигателя в цикле функционирования АТС, либо вообще отказаться от его использования на АТС. В первом случае задача решается за счет использования комбинированных энергосиловых установок (КЭСУ). Второй случай означает переход от автомобилей к электромобилям.

Классификация ЭАТ

Комбинированная энергосиловая установка содержит и тепловой двигатель, который либо непосредственно вращает ведущие колеса АТС, либо вращает электромашинный генератор (ЭГ), обеспечивающий питание тягового электродвигателя, и тяговый электропривод (ТЭП), который либо работает совместно с тепловым двигателем, либо самостоятельно. При использовании КЭСУ электроэнергия вырабатывается на борту АТС посредством ЭГ, приводимого во вращение тепловым двигателем. Дополнительно могут быть установлены накопители — электрохимические аккумуляторы и молекулярные конденсаторы. Накопители можно подзаряжать от ЭГ, при рекуперативном торможении и на зарядных станциях. Достоинство использования КЭСУ состоит в том, что часть пути АТС может проходить на электрической тяге, и только остальную часть пути — при работающем тепловом двигателе. В результате объем сжигаемого органического топлива и вредных выбросов при том же пройденном пути снижается.

Известны попытки использовать другие способы получения электроэнергии на борту АТС [5, 6]. Например, использовать солнечные батареи или топливные элементы. В настоящее время эти способы недостаточны эффективны и широко не используются.

Наибольшие надежды на пути широкого применения электромобилей возлагают на новые типы аккумуляторов. Приведем таблицу сопоставления показателей трех типов аккумуляторных батарей: свинцово-кислотной (наиболее традиционной), литий-ионной (современной) и литий-воздушной (кислородной), как наиболее перспективной.

Попытки использования на электромобиле свинцово-кислотных батарей в качестве тяговых не прекращаются благодаря низкой стоимости. Но они бесперспективны из-за низкой удельной энергоемкости и большой массы этих батарей. Получили распространение литий-ионные батареи, благодаря чему количество выпускаемых электромобилей в последние годы увеличилось. Но и они не имеют достаточной энергоемкости. От начала их применения до начала коммерциализации прошло примерно 14 лет. В последние годы ведутся интенсивные работы по созданию литий-кислородных (воздушных) батарей. Их энергоемкость на 2 порядка выше, чем у литий-ионных и с запасом удовлетворяет потребности электромобиля. Но пока не определена их стоимость. Кроме того, их широкое внедрение ожидается не раньше 2026 г., т.е. примерно через 13 лет.

Таким образом, в условиях отсутствия накопителей электроэнергии с приемлемыми основными показателями рассчитывать на широкое использование электромобилей не приходится. Наиболее перспективными на ближайшие 15 — 20 лет следует признать АТС с ком-

Сопоставления показателей трех типов аккумуляторных батарей

Показатель	Тип аккумуляторных батарей		
	свинцово-кислотный	литий-ионный	литий-воздушный
удельная энергоемкость, Вт·час/кг	40 — 45	110 — 190 250	8 — 13
емкость, А·ч	60 — 80	100 — 150	700 — 1500
масса, кг	15 — 22	6 — 10	3 — 5
число циклов, заряд/разряд	500 — 800	< 1000 < 300	> 2000
стоимость, тыс. руб.	3 — 8	100 — 150	—
год появл.	1857	1991	2013
год исп.	1859	2005	2026

бинированными энергосиловыми установками. Причем, по мере увеличения энергоемкости накопителей будут уменьшаться мощность теплового двигателя и увеличиваться мощность тягового электропривода.

Сравнение функциональных схем энергосиловых установок АТС

На рис. 1 приведена функциональная схема энергосиловой установки (ЭСУ) обычного автомобиля с тепловым двигателем, двигателем внутреннего сгорания (ДВС). Силовой канал содержит резервуар топлива РТ, ДВС, механическую трансмиссию МТ и движитель (ведущие колеса К1 и К2). Стартерная аккумуляторная батарея АкБ и стартер Ст служат для запуска ДВС. При выключенном ДВС АкБ используется для питания бортовых потребителей БП. При работающем ДВС питание БП осуществляется от генератора Г, который используется и для подзарядки АкБ. Механическая трансмиссия МТ содержит фрикционное сцепление, коробку переключения передач, главную передачу и дифференциал. Все механические устройства обладают сложной конструкцией, невысоким КПД и довольно трудно обеспечить их высокую надежность.

Для отопления салона используется тепло, выделяемое ДВС, который обычно имеет КПД не выше 43%. Жидкость системы охлаждения ДВС направляется в теплообменник, обдуваемый воздухом, подаваемым электрическим вентилятором либо из салона, либо снаружи. Для охлаждения салона используют кондиционер, питающийся от бортовой электрической сети, энергия в которую поступает от генератора и аккумулятора. Как уже отмечалось, основной недостаток такой ЭСУ состоит в том, что при работе ДВС выделяет вредные токсичные вещества. Кроме того, механическая трансмиссия содержит элементы, от которых желательно избавиться. В первую очередь это сцепление и коробка переключения передач.

На рис. 2 изображена функциональная схема ЭСУ электромобиля, позволяющая кардинально решить задачу устранения недостатков ЭСУ традиционного ав-

томобиля. В схеме ЭСУ электромобиля используется только электрическая энергия, запасенная в накопителях НАК. Пополнение запаса энергии возможно на зарядных станциях и в режиме рекуперативного торможения. Силовой канал содержит источник энергии НАК, силовую бортовую сеть и тяговый электропривод ТЭП, вращающий ведущие колеса. По сути ТЭП является комбинированной электромеханической системой, работающей как электропривод в тяговом режиме и как система генерирования в режимах торможения. Электромеханический преобразователь, т.е. собственно электрическая машина, подключен к бортовой сети через реверсивный электронный силовой преобразователь СП, выполняющий функции управляемого инвертора в тяговом режиме и функции управляемого

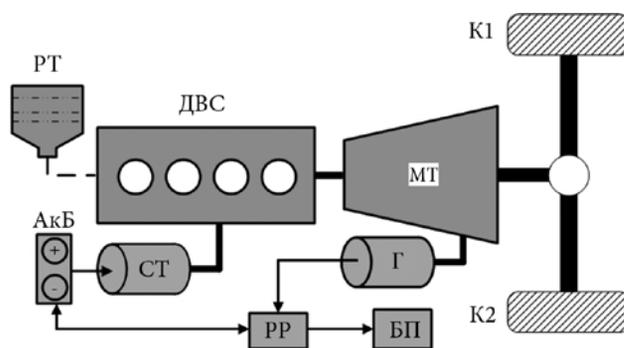


Рис. 1. Функциональная схема ЭСУ автомобиля

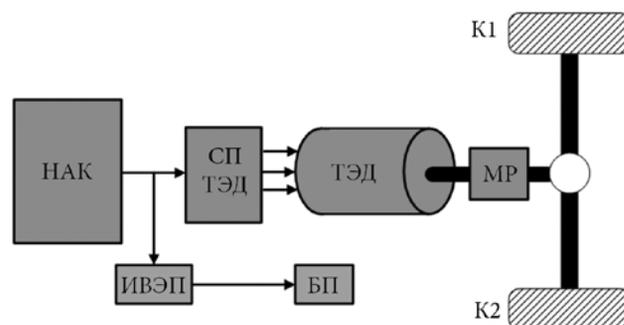


Рис. 2. Функциональная схема ЭСУ электромобиля

выпрямителя в тормозных режимах. Отсутствие ДВС позволяет решить экологическую задачу, а применение электрической трансмиссии избавляет от недостатков механической трансмиссии.

На сегодня переход к повсеместному использованию электромобилей сдерживается, во-первых, как уже отмечено, отсутствием соответствующих накопителей, а во-вторых сложностями обеспечения температурного режима на борту АТС. Так как КПД тягового электропривода составляет не ниже 80%, то выделяемой им тепловой энергии недостаточно для отопления салона. Практика показывает, что для нужд отопления и вентиляции требуется энергия не менее 4 кВт. Эту энергию приходится отбирать у накопителей. Поэтому их емкость требуется существенно повысить.

На рис. 3 представлена функциональная схема КЭСУ последовательного типа. Особенность состоит в том, что здесь ДВС предназначен не для вращения колес, а исключительно только для вращения тягового генератора. Следовательно, имеется возможность заменить традиционный ДВС с кривошипно-шатунным механизмом на свободнопоршневой ДВС, существенно уменьшив за счет этого объем и массу СЭУ, а в сочетании с ним использовать линейный электрический генератор. Вторая особенность заключается в том, что механическая трансмиссия полностью заменена на электрическую. Оптимальное управление ДВС посредством цифровых регуляторов позволяет увеличить его КПД во всех режимах работы и снизить потребление органического топлива и вредных выхлопов, а оптимальное управление электроприводом — существенно повысить КПД передачи в сравнении с механической трансмиссией, убрав сцепление и коробку переключения передач. Использование накопителей электроэнергии обеспечивает движение на электротяге с выключенным ДВС и также снижает потребление органического топлива. По мере роста энергоемкости накопителей достаточно просто уменьшать мощность ДВС. КЭСУ последовательного типа по существу является переходным вариантом к СЭУ электромобиля.

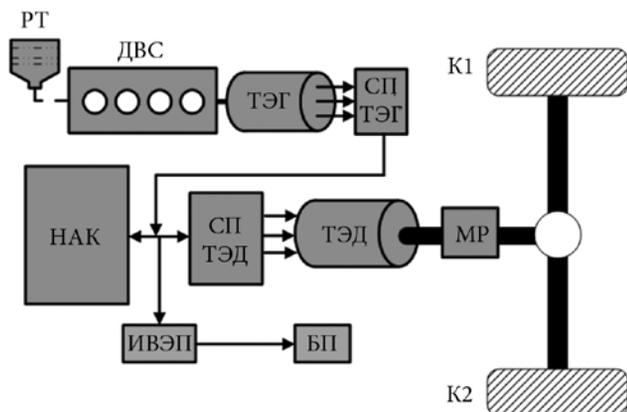


Рис. 3. Функциональная схема КЭСУ последовательного типа

На рис. 4, 5 показаны функциональные схемы КЭСУ параллельного типа. Такое название они получили потому, что потоки энергии параллельно складываются в механической трансмиссии и далее поступают на ведущие колеса. Сравнение рис. 4, 5 с рис. 1 показывает, что схемы параллельного типа построены на базе ЭСУ традиционного автомобиля. К обычному силовому каналу, передающему крутящий момент от ДВС, параллельно добавлен второй канал, передающий электроэнергию от накопителей к тяговому электродвигателю, крутящий момент от которого складывается в механической трансмиссии с моментом от ДВС. Основное достоинство состоит в том, что схема КЭСУ позволяет уменьшить мощность ДВС, компенсировав это мощностью тягового электродвигателя, и снизить потребление органического топлива. Кроме того, реализация схемы параллельного типа не требует существенной перестройки технологического процесса изготовления СЭУ — все, как обычно в автомобиле, но добавлен электрический канал.

Недостаток схем КЭСУ параллельного типа состоит в том, что в ней остается механическая трансмиссия со всеми ее недостатками, обусловленными фрикционным сцеплением, коробкой переключения передач и механическим дифференциалом.

По схеме рис. 4 (простая параллельная комбинация источников крутящего момента или «легкий гибрид»)

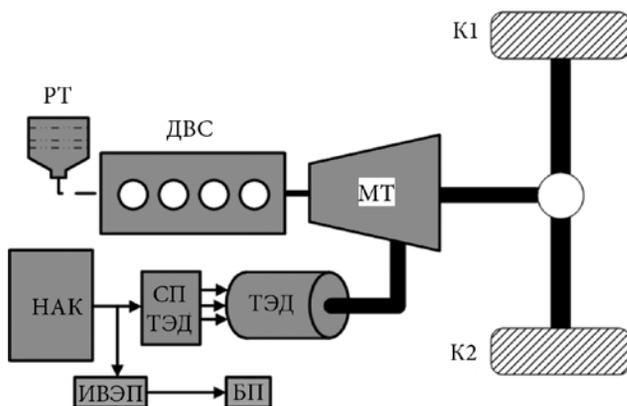


Рис. 4. Функциональная схема КЭСУ параллельного типа

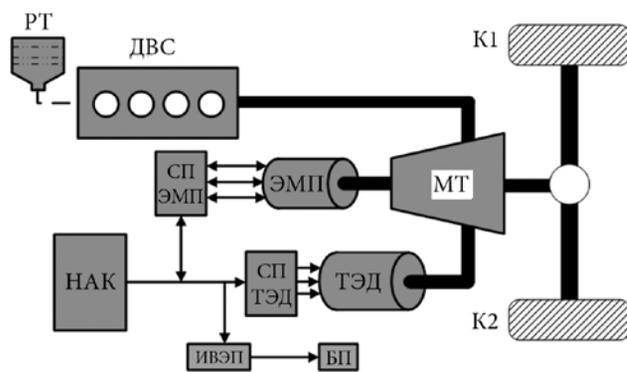


Рис. 5. Функциональная схема КЭСУ последовательного-параллельного типа

полагается, что вращение колес можно осуществлять либо отдельно от ДВС, либо от ТЭД, или совместно от обоих источников момента. Изначально заложено использование режима рекуперации. Но пока никто не использует режим подзарядки накопителей при вращении ТЭД в режиме генератора посредством ДВС, хотя это принципиально возможно и полезно. Не используют имеющийся в системе ТЭД и в режиме стартера, хотя это тоже вполне возможно, т.е. пока используют не все возможности простой параллельной схемы КЭСУ с одной электрической машиной. Отсутствие механической трансмиссии дает преимущество КЭСУ последовательного типа в сравнении со схемой параллельного типа.

Понимая, что неплохо бы иметь возможность подзарядить накопитель на борту АТС, некоторые фирмы, например, «Тойота» [7], усложнили КЭСУ параллельного типа, поставив в нее дополнительную электрическую машину. Такую сложную параллельную комбинацию часто называют «тяжелым гибридом» (см. рис. 5). Конечно, дополнительную электрическую машину можно использовать в качестве вращаемого от ДВС генератора и посредством него заряжать накопители. Но то же самое можно делать посредством основного ТЭД, подключенного совершенно так же. Можно представить себе следующий режим: ДВС вращает дополнительную электрическую машину в режиме генератора, который заряжает накопитель. Энергия от накопителя поступает в основной ТЭД, который вращает колеса. Этот режим не рационален, так как в рассматриваемой КЭСУ параллельного типа есть возможность передать крутящий момент от ДВС непосредственно на колеса, минуя многократное преобразование энергии. Для «Тойоты Приус» в [8] указано, что в «нормальном» движении используется следующий режим: часть крутящего момента передается от ДВС непосредственно на колеса (через механическую передачу), а другая часть идет параллельным путем — ДВС вращает дополнительную электрическую машину в режиме генератора, от которого питается основной ТЭД, обеспечивающий дополнительный крутящий момент, передаваемый на колеса через ту же механическую передачу. При этом накопитель бездействует. Такой режим не будет рациональным. Нет никакого смысла многократно преобразовывать часть энергии ДВС, теряя при этом КПД. Разумнее всю мощность ДВС затратить на создание крутящего момента. И еще один режим усложненной схемы КЭСУ параллельного типа описан в [9]. Один параллельный канал обеспечивает крутящий момент непосредственно от ДВС, а второй параллельный канал также делит на 2 канала: от одних и тех же накопителей питается и основной ТЭД, и дополнительная машина в режиме тягового

двигателя. Таким образом, в механической трансмиссии складываются моменты от ДВС, основного ТЭД и дополнительного электродвигателя. И здесь дополнительная электрическая машина оказывается лишней.

На рис. 6 показана последовательная схема, построенная на базе схемы силовой установки электромотоцикла. Здесь тоже ДВС используется исключительно только для вращения генератора, а не колес. Поэтому возможно использование линейного генератора и свободнопоршневого ДВС. Но есть особенность, которая состоит в том, что ДВС выведен из основного силового канала. ДВС с генератором служат только для подзарядки НАК на борту транспортного средства. Это самое близкое приближение к электромотоциклу. По мере того, как накопители все больше будут устраивать по энергоемкости, массе, объему и стоимости, мощность ДВС и генератора можно будет уменьшать и, наконец, совсем их убрать.

Итак, все необходимые функции: создание дополнительного крутящего момента при питании от накопителей, подзарядка накопителей на борту, запуск ДВС в режиме стартера, — в схеме КЭСУ параллельного типа может выполнять одна электрическая машина. Следовательно, усложненная схема КЭСУ параллельного типа («тяжелый гибрид») представляет собой шаг назад в сравнении с простой параллельной комбинацией источников крутящего момента. В свою очередь, схема КЭСУ последовательного типа выигрывает за счет полного отсутствия механической трансмиссии.

Полезным компромиссным вариантом может оказаться схема СЭУ электромотоцикла, дополненная каналом подзарядки накопителей на борту, содержащим маломощные ДВС и зарядный электрический генератор.

Разработки кафедры в создании транспортных средств с накопителями энергии

Повышение энергоэффективности транспортных средств возможно за счет снижения потерь при пуске и возврате энергии торможения. Первое решается применением импульсного регулирования напряжения на тяговой машине. Второе — путем установки накопите-

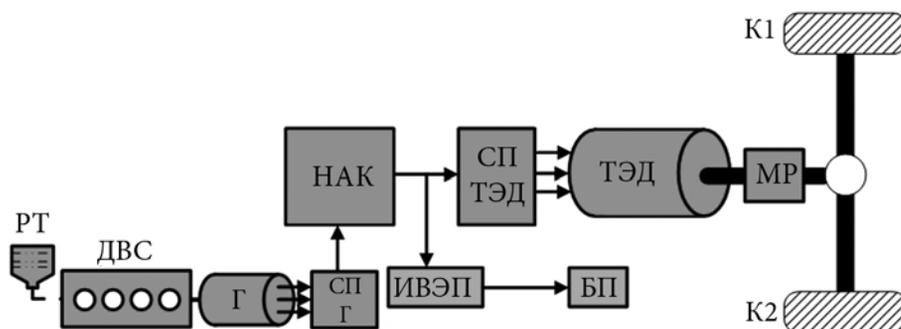


Рис. 6. Функциональная схема КЭСУ с подзарядкой НАК на борту

ля энергии для аккумуляции энергии торможения, при этом решается вопрос автономного движения ТС при отсутствии внешнего питания, будь то контактная сеть или автономная энергетическая установка. На кафедре в 2002 — 2004 гг. проводились работы по применению накопителей на троллейбусе совместно с Вологодской холдинговой компанией. Троллейбус, выполненный по функциональной схеме ЭСУ электромобиля (см. рис. 2), полной массой 18 т имел накопитель энергии на суперконденсаторах с запасенной энергией около 20 МДж и обеспечивал на горизонтальном участке пробег до 5 км. С 2006 г. работы продолжились с ГУП «Майкопское троллейбусное управление». Был создан опытный образец дуббуса с гибридной энергетической установкой последовательного типа (см. рис. 3) на базе двигателя от автомашины ВАЗ с генератором на 60 кВт и накопителем на суперконденсаторах с запасенной энергией около 7 МДж, который обеспечивал на горизонтальном участке пробег без ограничения. Данные тяговые приводы выполнены с двигателями постоянного тока. В настоящее время на кафедре проводятся работы по созданию тяговых приводов с машинами переменного тока. Разработаны принципы управления и произведено математическое моделирование.

Управление электрическими машинами и их моделирование

Единство физических законов, лежащих в принципе работы всех электрических машин, является теоретической основой их обобщенной математической модели, позволяющей описывать в единой форме как процессы электромеханического преобразования энергии, так и способы эффективного управления этим процессом.

Конструктивно любая электрическая машина представляет собой совокупность двух видов взаимосвязанных контуров — электрических и магнитных. В пределах каждого из контуров существует двунаправленная детерминированная связь электромагнитных процессов, описываемых законами силового взаимодействия проводников с током и электромагнитной индукцией. В общем виде физические величины, фигурирующие в этих законах, являются функциями пространственных координат и времени, а электромеханические характеристики электрических машин определяются интегральными уравнениями этих процессов, что существенно усложняет их анализ.

Существенную роль в упрощении математического описания этих процессов играют закон полного тока, теорема Стокса и экспоненциальные функции комплексной переменной. Ключевая роль в этом описании отведена понятию фазора.

Фазор представляет собой интегральную комплексную функцию, взятую в соответствии с теоремой Стокса по площади поверхности, натянутой на весь контур,

и отображает поток, пронизывающий этот контур, как по направлению его действия, так и по распределению его плотности.

Фазоры удобно рассматривать в трех основных системах отсчета:

- α, β , связанной со статором;
- x, y , связанной с ротором;
- d, q , связанной с фазором полной намагничивающей силы (н.с.) машины.

Переход от одной системы отсчета к другой может легко осуществляться путем умножения исходного выражения на оператор вращения $e^{j\omega t}$ относительно исходной системы отсчета.

В соответствии с законом полного тока полную (результатирующую) намагничивающую силу электрической машины в системе α, β можно представить в виде фазора:

$$\tilde{A}_{0(\alpha\beta)} = \tilde{A}_{s(\alpha\beta)} + \tilde{A}_{r(\alpha\beta)} = |\tilde{A}_0(t)| e^{j(\varphi_0 + \nu_0)} = A_0(t) e^{j(\varphi_0 + \nu_0)},$$

где φ_0 — начальный угол фазора в пространстве рабочего зазора машины; $\nu_0 = \omega_0 t$ — текущий угол фазора в пространстве рабочего зазора машины; \tilde{A}_s, \tilde{A}_r — фазоры н.с. статора и ротора; A_0 — модуль (амплитуда) фазора полной н.с. машины.

Если статором машины является якорь, то фазор полной н.с. и, соответственно, система d, q вращаются относительно статора с синхронной частотой ω_0 .

Фазор главного (результатирующего) магнитного потока машины может быть представлен в виде $\tilde{\Phi}_0 = G_0 \tilde{A}_0$, где G_0 — главная магнитная проводимость машины, Гн, характеризующая ее магнитную систему и являющаяся конструктивным параметром.

В соответствии с законом электромагнитной индукции ЭДС проводникового контура статора в системе отсчета α, β от главного магнитного потока может быть записана в виде фазора:

$$\begin{aligned} \tilde{\Theta}_{0(\alpha\beta)} &= -w_s \frac{d\tilde{\Phi}_{0(\alpha\beta)}}{dt} = -w_s G_0 \frac{d\tilde{A}_{0(\alpha\beta)}}{dt} = \\ &= -w_s e^{j\nu_0} \left[G_0 \left(\frac{dA_0}{dt} + A_0 j \frac{d\nu_0}{dt} \right) + A_0 \frac{dG_0}{dt} \right]. \end{aligned}$$

Используя интегральное преобразование Карсона для функций времени, получим:

$$\tilde{\Theta}_{0(\alpha\beta)}(s) = -w_s e^{j\nu_0} A_0 G_0 \left[(2s + j(s\nu_0)) \right],$$

где s — комплексный оператор времени; $j(s\nu_0)$ — оператор поворота в пространстве (на комплексной плоскости поперечного сечения машины).

Оператор s определяет изменение комплексной амплитуды (модуля фазора), а $j(s\nu_0)$ — положение в зазоре машины или фазы процесса.

Возможны следующие частные случаи, упрощающие рассмотрение процессов:

1) параметры главной магнитной цепи постоянны, тогда:

$$\tilde{\Theta}_{0(\alpha\beta)} = -L_0 s I_0 (1 + j\omega_0) e^{j\omega_0 t},$$

где L_0 — главная индуктивность машины (взаимоиндуктивность или индуктивность намагничивания), Гн.

2) параметры главной магнитной цепи постоянны и вращение равномерное, следовательно:

$$\tilde{\Theta}_{0(\alpha\beta)} = -L_0 I_0 (s + j\omega_0) e^{j\omega_0 t}.$$

Электромагнитный момент машины определяется ортогональными проекциями фазовых токов статора и ротора в соответствии с выражением:

$$M = \frac{mpL_0}{2} (I_{s\beta} I_{r\alpha} - I_{s\alpha} I_{r\beta}),$$

где m — количество фаз машины; p — количество пар полюсов машины.

В качестве примера приведем имитационное моделирование фазового управления тяговой асинхронной машиной в цикле движения на стандартном перегоне (рис. 7) и полученные результаты (рис. 8).

Выводы

В условиях отсутствия накопителей, удовлетворяющих по энергоёмкости, массе, объёму и стоимости, наиболее рациональной является функциональная схема комбинированной энергосиловой установки последовательного типа. По мере увеличения энергоём-

кости накопителей мощность двигателя внутреннего сгорания будут уменьшаться. В дальнейшем ДВС целесообразно будет вывести из силового канала и использовать только для привода зарядного генератора. Наконец, когда накопители будут удовлетворять потребности по всем показателям, от ДВС можно будет окончательно отказаться.

Литература

1. **Correa F.C. e.a.** Study of different electric vehicle propulsion system configurations // Proc. IEEE Veh. Power Propuls. Conf. (VPPC). 2015. N 1. P. 1 — 6.
2. **Boulanger A.G., Chu A.C., Maxx S., Waltz D.L.** Vehicle electrification: status and issues // Proc. IEEE. 2011. V. 99. N 6. P. 1116 — 1138.
3. **Chang L.** Comparison of AC drives for electric vehicles — a report on experts' opinion survey // Proc. IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag. 1994. V. 9. N 8. P. 7 — 11.
4. **Ardila-Gomez A., Ortegon-Sanchez A.** Sustainable urban transport financing from the sidewalk to the subway. Washington, DC: World Bank, 2016.
5. **Paankar M.M., Wandhare R.G., Agarwal V.** A high performance power supply for an electric vehicle with solar PV, battery and ultracapacitor support for extended range and enhanced dynamic response // Proc. IEEE 40th Photovolt. Spec. Conf. PVSC. 2014. P. 3568 — 3573.
6. **Cheng G.U., Hao L.I.U., Xinbo C., Shaoming Q.** Parameter design of the powertrain of fuel cell electric

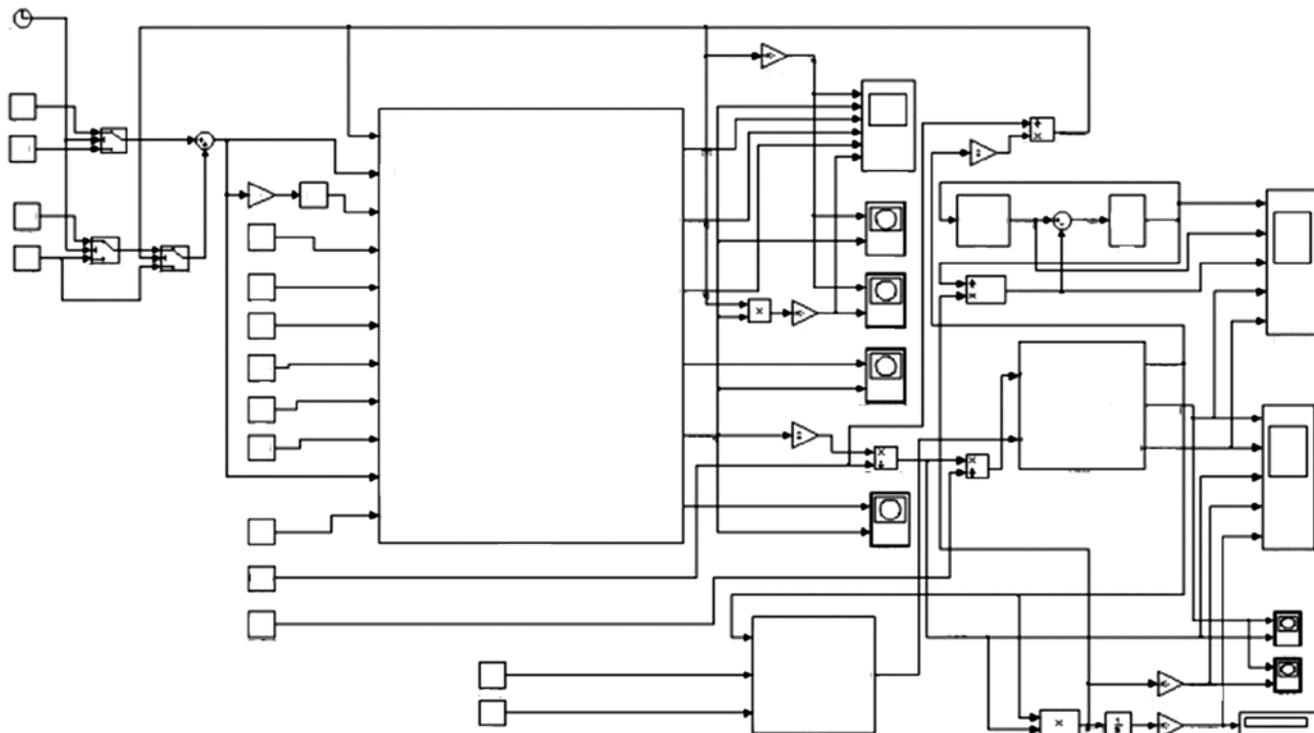


Рис. 7. Математическое моделирование тягового привода с асинхронной машиной в цикле движения

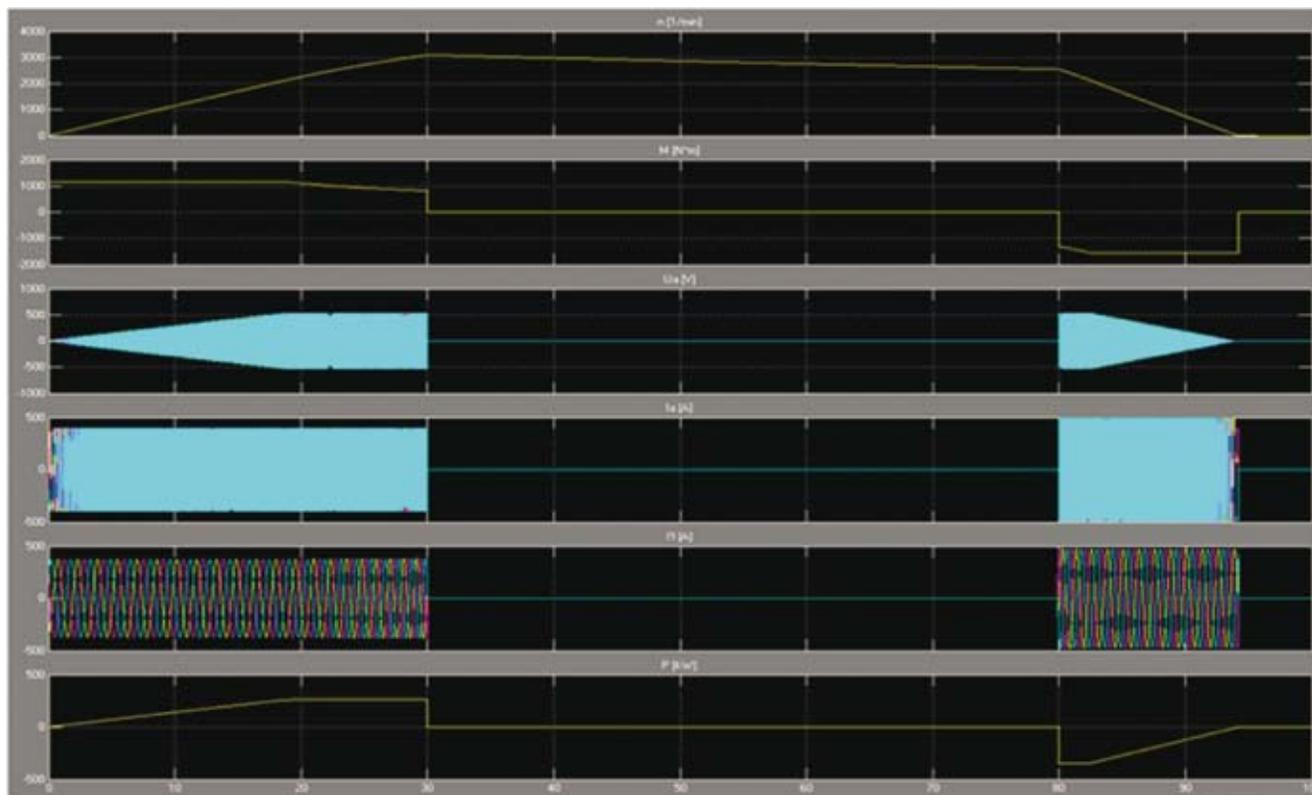


Рис. 8. Результаты моделирования тягового привода с асинхронной машиной в цикле движения

vehicle and the energy management strategy // Proc. IEEE. 2015. P. 8027 — 8032.

7. **Sefik I., Hiyama T.** Performance evaluation of hybrid powertrain system simulation model for Toyota Prius car // Proc. Int. Aegean Conf. Electr. Mach. Power Electron. ACEMP 2011. Electromotion 2011. Jt. Conf. 2013. P. 404 — 407.

8. **Nasiri H., Radan A., Ghayebloo A., Ahi K.** Dynamic modeling and simulation of transmotor based

series-parallel HEV applied to Toyota Prius 2004 // Proc. 10th Int. Conf. Environ. Electr. Eng. EEEIC.EU 2011. 2011. N 4. P. 4 — 7.

9. **Hosking T.** Comparative evaluation and analysis of the 2008 Toyota Lexus, Camry and 2004 Prius. DC Link Capacitor Assembly vs the SBE Power Ring DC Link Capacitor. 2009. P. 717 — 723.

Статья поступила в редакцию 09.06.2016