

УДК 629.113.65

ПОСТРОЕНИЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА НА ОСНОВЕ МНОГОДВИГАТЕЛЬНОЙ СХЕМЫ

Е.А. Смотров, к.т.н. / Д.В. Вершинин / О.Г. Дашко / Е.В. Савилов

Перспективность применения автономного электропривода для городских автотранспортных средств, мало у кого вызывает сомнения. Это утверждение основывается не только на экологических аспектах, которые в будущем будут играть доминирующую роль в развитии городского транспорта и транспорта для закрытых территорий, но и на анализе данных энергоэффективности электромобиля, приведённых в таблице [1]. В конечном итоге, электромобиль практически в 2 раза эффективнее расходует энергию на движение. К этому необходимо добавить простоту конструкции, и как следствие, низкую стоимость обслуживания электромобилей. На практике экономия энергии, эквивалентная 7-8 литрам бензина на каждые 100 км для микроавтобуса в городском цикле, даёт 120-140 рублей экономии, что позволяет окупить разницу в цене примерно после 100 тыс. км пробега.

Немаловажным фактором в пользу применения электротранспорта является также дефицит ископаемого углеводородного топлива и нестабильная цена нефти на мировом рынке.

В некоторых публикациях приводятся количественные прогнозы развития продажи массовых транспортных средств с электрифицированными силовыми установками. В них просматривается общая тенденция сначала возрастания, а потом снижения продажи гибридных автомобилей и «подзаряжаемых» гибридных автомобилей, при последующем значительном увеличении продаж накопительных электромобилей.

Так, организация «Electrification Coalition», состоящая из старших управляющих крупнейших аме-

риканских корпораций, прогнозирует следующее поэтапное увеличение доли электрифицированных автомобилей в общем парке лёгких автотранспортных средств США: 5% — к 2020 г.; 42% — к 2030 г. и 70% — к 2040 г. [2].

Конструктивно электрифицированные транспортные средства (ЭТС) по исполнению можно разделить на:

- однодвигательные, созданные на базе классической кинематической схемы с механическими передачами — трансмиссиями, и
- многодвигательные — с независимым электроприводом (ЭП) каждого колеса.

Некоторые преимущества последних при использовании мотор-колес (МК) представлены в [3].

Таблица.

Сравнительная таблица энергоэффективности различных типов силовых установок автомобилей						
Силовая установка	Автомобиль	Исходный источник энергии	Эффективность переработки, доставки и заправки (суммарно)	Расстояние, проходимое на единицу топлива	Энергетическая эффективность автомобиля, км/МДж	Полная энергетическая эффективность, км/МДж
Двигатель на природном газе	Honda CNG	Природный газ	86,0%	17,5 км/кг	0,39	0,32
Водородные топливные элементы	Honda FCX	Природный газ	61,0%	84 км/кг	0,7	0,43
Дизельный двигатель	VW Jetta Diesel	Нефть	90,1%	17,2 км/л	0,47	0,42
Бензиновый двигатель	Honda Civic VX	Нефть	81,7%	14,2 км/л	0,46	0,38
Гибридный автомобиль (Бензин/Электро)	Honda Insight	Нефть	81,7%	17,3 км/л	0,56	0,46
Электро	Tesla Roadster	Природный газ	52,5%	151 Вт·ч/км	1,84	0,97

При создании ЭТС, и как частного их случая, многодвигательных (МЭТС), возникает ряд проблем перераспределения энергии как общего, так и специфического свойства.

К первым относится проблема накопления электроэнергии при торможении (рекуперации). Способность ЭТС обеспечить условия для накопления кинетической энергии при торможении в виде электрического заряда является его принципиальным отличием от транспортного средства (ТС) с двигателем внутреннего сгорания. Аккумуляторные батареи (как и водородные источники на основе топливных элементов) не в состоянии принять эту энергию в достаточных объемах и с интенсивностью, адекватным процессу торможения. Это обстоятельство приводит к необходимости использовать для решения этой проблемы конденсаторы большой емкости — так называемые суперконденсаторы (СК) с двойным электрическим слоем, обладающие высокими удельными характеристиками по запасаемой энергии [4]. Эта проблема актуальна не только для ЭТС с автономным (внутренним, находящимся на борту) силовым источником питания (СИП), но и для ЭТС с внешним СИП, если он не обладает свойством обратимости (обычная контактная сеть трамвая, троллейбуса или метро).

Многодвигательная кинематическая схема ЭТС на базе независимых электроприводов колес требует оригинальной системы управления. В транспортном средстве в общем случае — при непрямолинейном движении — скорость колес разная. В автомобиле эта проблема решается независимой подвеской свободно катящихся ведомых колес и применением механического дифференциала для колес ведущей оси. В МЭТС эту задачу необходимо решать электронным путем, т.е. обеспечить формирование закона управления ЭП МК каждой из осей для обеспечения оптимального распределения моментов МК при различных режимах движения ЭТС: движение в повороте, реализацию «электронного» дифференциала, антиблокировочной, противобуксовочной систем и т.п., для чего необходимо иметь информацию об углах поворота управляемых колес.

На практике прямое измерение углов поворота передних колес, которые, кроме поворота в горизонтальной плоскости, перемещаются по вертикали относительно шасси за счет хода подвески, и кроме того, находятся в тяжелых условиях эксплуатации (вода, грязь), является непростой технической задачей. Гораздо проще эта функция может быть реализована путем измерения угла поворота вала рулевого колеса. При этом конструкция датчика становится проще, а условия его эксплуатации лучше. При разработке системы на основе информации об углах по-

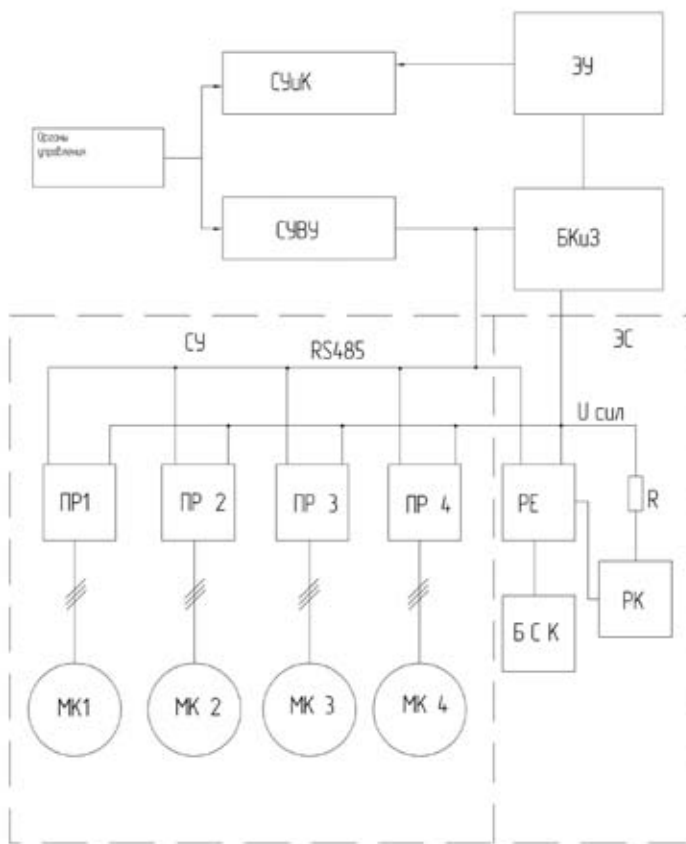


Рисунок 1. Структурная схема тягового электропривода МЭТС

ворота передних колес, однозначно определяемых датчиком положения рулевого колеса, можно определить математические выражения для соотношения скоростей колес, если в качестве базовой величины выбрать, например, скорость переднего наружного колеса, задаваемую педалью управления акселератором.

На рис. 1 представлена разработанная структурная схема тягового привода четырехколесного МЭТС.

На схеме показана силовая установка (СУ), содержащая мотор-колеса МК1–МК4 с преобразователями ПР1–ПР4, энергонакопительная система (ЭС), в которую входят рекуператор (РЕ), блок суперконденсаторов (БСК) и разрядный ключ (РК) с балластным резистором R, связанные с энергетической установкой (ЭУ) через блок коммутации и защиты (БКиЗ). Питание ЭУ осуществляется от источника питания, собранного на базе Li-ion аккумуляторной батареи со встроенной системой управления и контроля.

Органы управления (ОУ) скоммутированы с системой управления и контроля (СУиК) и системой управления верхнего уровня (СУВУ) при помощи

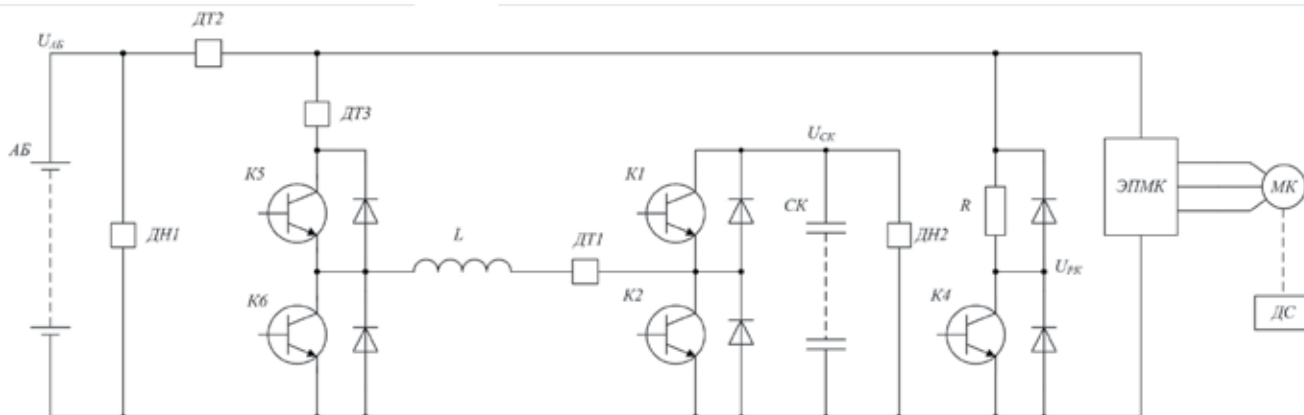


Рисунок 2. Схема преобразователя РЕ

проводных линий связи, а последняя подключена к СУ и ЭС через интерфейс передачи данных RS-485. Предложенное разделение тягового электрооборудования на функционально законченные составные части, позволяет четко сформулировать требования к узлам и элементам.

ОУ включают в себя: замок зажигания, разрешающий работу ЭП МК и включающий питание вспомогательных агрегатов; переключатель режима движения ТС с положениями: В (вперед), Н (назад), С (стоп, с возможностью реализации функции рекуперативного торможения при движении ТС вниз по уклону и заданном тормозном моменте не менее номинального), СХ (свободный ход — система ЭП МК «заперта» по управлению при включенном питании); педаль акселератора, задающую величину скорости ТС, и оснащенную датчиком положения педали (например, аналоговым резистором или бесконтактным датчиком перемещения); педаль тормоза с функцией задания величины электрического тормозного момента при помощи датчика положения педали, связанная с гидравлической системой торможения; рулевое колесо, связанное с датчиком угла поворота, однозначно определяющим угол поворота колес; переключатель режима работы силовой установки с положениями: передне-, задне- и полноприводный режимы.

СУиК включает в себя управление исполнительными элементами обычного автомобильного электрооборудования, а также информационный дисплей, с выводом на него информации о скорости, режимах работы и состоянии ЭУ и СУ.

СУВУ должна обеспечить задание величины и направления скорости и (или) момента независимых ЭП МК с учетом информации с датчиков положения рулевого колеса, педалей акселератора и тормозного момента, переключателей режимов работы и характера движения МЭТС. Зависимости

углов поворота передних колес от приведенного угла поворота рулевого колеса, при применении принципа Аккермана (пересечении осей всех колес при повороте в одной точке) имеют нелинейный, но однозначный характер, определяемый геометрией ТС. Это позволяет использовать сигнал датчика положения рулевого колеса для корректировки величин скорости и (или) момента независимых ЭП МК осей.

Быстродействие СУВУ должно быть достаточным для эффективного управления независимыми ЭП во всём диапазоне скоростей мотор-колес, которые однозначно связаны между собой через дорожное покрытие,

ЭС должна обеспечить накопление кинетической энергии ТС при торможении в виде электрического заряда с последующим использованием при разгоне и движении. Наличие БСК позволяет использовать накопленную энергию при разгоне (трогании) ЭТС для уменьшения пусковых токов аккумуляторной батареи ЭУ, с целью сохранения максимальной длительности жизненного цикла батареи.

В работе [5] проведен сравнительный анализ различных схем включения СК в состав ЭС. Там же показано, что значительного снижения массы (объема) БСК можно добиться за счет увеличения коэффициента использования БСК, зависящего от соотношения величин максимального и минимального напряжений на БСК. Поэтому РЕ построен на базе 4х-ключевого повышающе-понижающего DC-DC преобразователя (рис. 2).

Основной канал РЕ представляет собой систему стабилизации тока заряда-разряда АБ за счет энергии, запасаемой (отдаваемой) БСК. При заряде АБ (торможение ЭТС в режиме рекуперации) ток заряда определяется паспортными данными АБ. При разряде АБ величина тока разряда определяется соответствующей статической состав-

ляющей тока (момента), т.е. величиной тока АБ, при которой происходит трогание (начало движения) ТС.

Управляющим сигналом для РЕ является сигнал датчика тока ДТ2, определяющего ток АБ. Датчик тока ДТ3 формирует сигнал обратной связи по току РЕ. В РЕ предусмотрен также вспомогательный контур стабилизации напряжения БСК (на схеме не показан). Указанный контур при промежуточных значениях скорости ТС обеспечивает уровень напряжения на СК, достаточный для обеспечения динамической составляющей пускового тока при разгоне от промежуточного значения до максимального значения скорости, и поддерживает возможность накопления в БСК энергии рекуперации при торможении ТС от промежуточного значения скорости до полной остановки.

Для выбора величины емкости СК возможны следующие подходы:

- на основании анализа движения ТС в городском цикле НАМИ;

- на основании анализа предельного режима — аварийного торможения (с предельным ускорением) с максимальной скорости при максимальной загрузке ТС;

- из условия полной компенсации динамической составляющей тока приводов с целью максимальной разгрузки АБ.

В состав ЭС входит также разрядный ключ К4 с балластным резистором R, который образует систему стабилизации предельного напряжения на зажимах ЭУ при полном заряде БСК (например, затяжной спуск с горы).

Рассматриваемая структура была использована при создании МЭТС в рамках программы [6]. Собраны два макетных образца МЭТС:

- 14-местный электробус на шасси серийного образца модели FIAT Ducato производства Соллерс-Елабуга на основе электроприводов ЭП МК-20 [3] (рис. 3);

- 6-местная гольф-машина на оригинальном шасси на основе мотор-колес МК-2,5 (рис. 4).



Рисунок 3. Электробус на шасси модели Ducato



Рисунок 4. Гольф-машина на базе мотор-колес МК-2,5

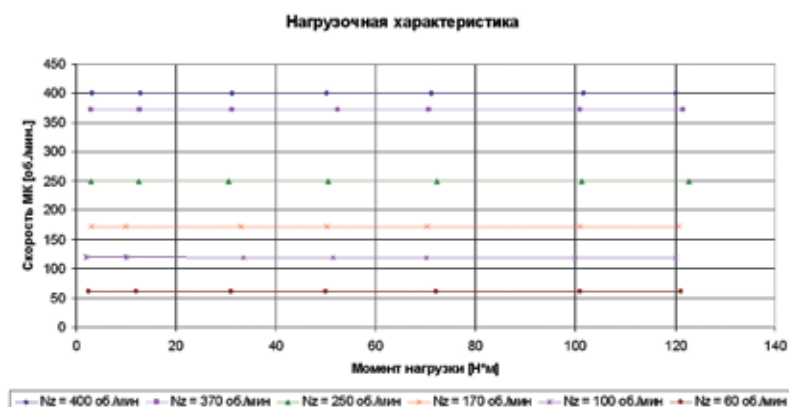
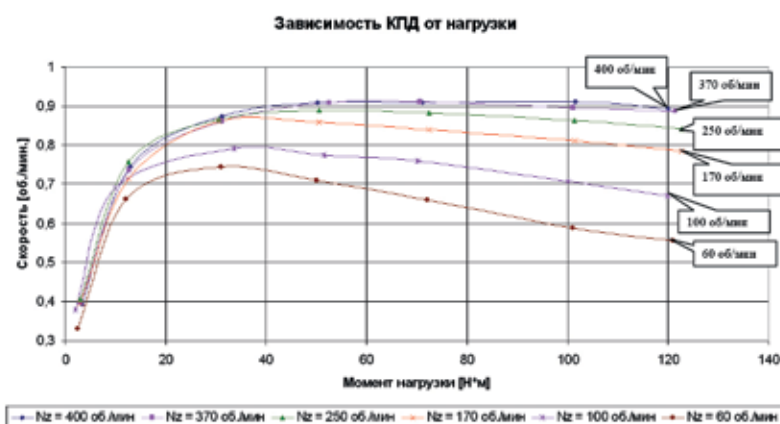


Рисунок 5.

- а) Экспериментальные нагрузочные характеристики ЭП МК-2,5;
 б) Экспериментальные энергетические характеристики ЭП МК-2,5



СУ гольф-машины собрана на основе электроприводов МК-2,5 [7]. Экспериментальные характеристики ЭП МК-2,5 приведены на рис. 5а и 5б.

Как видно из рис. 5а, электропривод обеспечивает высокую жесткость электромеханических характеристик в рабочем диапазоне регулирования скорости и получение движущих моментов до предельного включительно в нижней части диапазона регулирования.

Предварительные ходовые испытания вышеуказанных МЭТС подтверждают эффективность принятого построения структуры тягового электропривода, обеспечивающего однозначное определение граничных условий стыковки узлов и технических требований к ним.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- О.В. Закарчевский, А.А. Отарский, И.Г. Григорьев. Использование современного электропривода в автомобиле. Материалы НИИ КЭУ. ФГОУ ВПО «МГАУ им. В.П. Горячкина».
- Эткин Д.М. «Некоторые технико-экономические аспекты электрификации массовых автомобилей в США». 2010. ААИ № 2 и № 3.
- Д.В. Вершинин, О.Г. Дашко, Е.А. Смотров, Ю.П. Кривоспицкий. / Выбор кинематической схемы электрического транспортного средства.// Приводная техника № 5 (81), 2009 г, с. 32-36.
- А. Деспотули, А. Андреева. / Суперконденсаторы для электроники.// Современная электроника № 5, 2006, с. 10-14.
- Вершинин Д.В., Водичев В.А., Войтенко В.А., Смотров Е.А., / Особенности выбора параметров бортового источника питания электротранспортного средства, // Электромашиностроение и электрооборудование. — Киев. «Техника». — 2008. — Вып. 71. — С. 5 — 11.
- Будет создан экологически чистый транспорт нового типа / газета «Деловая пресса». — «Альянс-Медиа» — 26.06.2009. — № 23 (322).
- <http://inkar.mccinet.ru>