

УДК 621.1.006

Концепция расчета электрооборудования транспортных средств различного класса с гибридной силовой установкой

М. В. Румянцев*, В. А. Глушенков

Описан принципиальный подход к расчету параметров электрооборудования для городских пассажирских транспортных средств с гибридной силовой установкой (ГСУ), состоящей из энергетической установки (ЭУ), тягового преобразователя и накопителя энергии. Учтены факторы, сопровождающие процесс эксплуатации ТС с ГСУ: скорость сообщения, длина перегонов, динамические характеристики, запас хода, время техобслуживания, интеграция в систему транспортной инфраструктуры, электробезопасность, надежность и затраты на приобретение оборудования.

Приведена схема гибридной силовой установки последовательного типа, содержащей ЭУ, тяговый преобразователь, накопитель энергии, тяговый электродвигатель. Обоснована приемственность в проектировании систем тягового электропривода.

Кратко рассмотрен принцип действия ГСУ. Указаны компоненты баланса мощности, особенности параметров, соответствующие стандартному и критическому циклам движения, значения КПД компонентов ГСУ для учета энергетических потерь в ГСУ, особенности стандартного цикла движения, влияющего на расчет ГСУ – значения ускорения, замедления и др. Перечислены основные допущения и принципы расчета параметров ГСУ для ТС различного класса вместимости. Введено понятие удельных единиц.

В качестве критического цикла взято движение на подъеме с сохранением стандартной длины перегона и скорости сообщения. Сформулированы описание выбора величины уклона для критического цикла движения, требования к ТС в части работе в критическом цикле движения.

Представлена характеристика критического цикла, которая обуславливает расчет и выбор основных компонентов ГСУ: мощности энергоустановки, мощности и энергетической емкости накопителя энергии и оптимизации их параметров.

Ключевые слова: дубус и электробус, накопитель энергии, тяговый электропривод, транспортное средство с гибридной силовой установкой.

В настоящее время все активнее ведутся работы по проектированию, изготовлению и внедрению в серийное производство образцов транспортных средств (ТС) с накопителями энергии и компонентами тягового электрического привода. Эта тенденция имеет объективные предпосылки: появление элементной базы для

накопления и преобразования электроэнергии на борту ТС и, кроме того, необходимость радикального снижения потребления топлива и количества вредных выбросов в атмосферу. Техническая суть этой тенденции проста: использование электрической энергии как более приспособленной для передачи, преобразования и накопления. Основная особенность развития техники в данном направлении заключается в применении бортовых накопителей электроэнергии, характеризующихся

* rummv@bk.ru

различными показателями: энергетической емкостью, мощностью, а также диапазоном рабочих температур, ресурсом по количеству циклов, стоимостными и массогабаритными параметрами. Кроме того, все предлагаемые в настоящее время решения подразумевают использование силовой электроники и систем управления ею [1].

Существуют различные схемы реализации использования накопленной электроэнергии: от применения накопителей на троллейбусах, электробусах до параллельного гибридного привода, в котором электрическая составляющая момента является лишь вспомогательной для потока энергии, создаваемой тепловым двигателем (ТД). Выбор той или иной схемы определяется задачами, для решения которых создается конкретная система тягового привода.

Определенным набором условий и особенностей обладает сфера городских пассажирских перевозок. Перечислим основные:

1. Значение скорости сообщения на маршруте находится в пределах 20 — 25 км/ч. Максимальная развиваемая скорость, как правило, не превышает 60 км/ч. Таким образом, отпадает необходимость в первичном источнике большой мощности для поддержания высокой скорости в длительном режиме.

2. Преобладают небольшие перегоны (300 — 400 м), что означает необходимость совершать частые пуски и торможения. Характерна сильная неравномерность реализуемой мощности во времени, что дает широкие возможности для оптимизации первичного источника энергии.

3. Предъявляются жесткие требования к динамическим характеристикам — значениям ускорения и замедления, которые должны быть близки к $1,5 \text{ м/с}^2$. Такие характеристики вполне успешно обеспечиваются тяговым электроприводом троллейбуса.

4. Запас хода без подзарядки от электрических сетей не менее 300 км в течение всего периода эксплуатации (не менее 7 лет) и в широком диапазоне температур ($-50 \dots +50$) °С.

5. Затраты времени на техобслуживание и ремонт компонентов тягового привода ограничены, что обусловлено необходимостью ежедневной технической готовности подвижного состава не менее 80...90%.

6. Существует мягкая интеграция в действующую инфраструктуру современных транспортных предприятий с учетом реальных темпов ее обновления, а именно: возможность зарядки накопителей большого количества ТС, унификация компонентов тягового привода с эксплуатируемыми системами.

7. Особые меры электробезопасности обеспечиваются при постоянном наличии на борту источника с напряжением не менее 400 В.

8. Есть гарантия общей надежности системы тягового привода. Пренебрежение этим требованием может привести к ряду нештатных ситуаций и повлечь

дискредитацию самой идеи внедрения перспективного тягового привода.

9. Обеспечивается приемлемая стоимость системы тягового привода.

Анализируя перечисленные условия и характеристики существующих накопителей электроэнергии, приходим к выводу, что наиболее целесообразным вариантом является схема ГСУ последовательного типа, которая позволяет наиболее полно использовать преимущества тягового электрического привода [1, 2]. Структурная схема ГСУ последовательного типа приведена на рис. 1. На схеме показаны электрические связи компонентов привода.

Основная задача гибридных силовых установок последовательного типа заключается в реализации такой работы привода, при которой тепловой двигатель стабильно работает в режиме минимального расхода топлива, т.е. на уровне 60 — 70% максимальной мощности. При этом нет необходимости в регулировании работы ДВС, за исключением режима холостого хода [1].

Для получения сбалансированной системы тягового привода необходим индивидуальный расчет всех его компонентов для каждого типа ТС, однако следует помнить о двух важных моментах. Во-первых, система последовательного гибрида содержит в себе привод, подобный троллейбусному: тяговый преобразователь — тяговый электродвигатель — трансмиссия — ведущие колеса [1]. Алгоритмы управления тяговым приводом троллейбуса хорошо изучены и отработаны. Во-вторых, среда внедрения гибридного привода, городские предприятия пассажирского транспорта, требует от разработчиков возможности мягкой интеграции продукции в существующую систему эксплуатации. Поэтому унификация значительной части оборудования с имеющимся позволит существенно облегчить начало линейной эксплуатации гибридных автобусов.

Основные принципы расчета параметров гибридной силовой установки:

ГСУ должна разрабатываться с учетом параметров конкретного рабочего цикла, в котором будет эксплуатироваться ТС. В качестве примера рассмотрим городской цикл движения, параметры которого приведены ниже [3].

Максимальная эффективность работы силовой установки достигается при эксплуатации в цикле с максимальной частотой остановок, что соответствует режиму работы городского пассажирского безрельсового ТС (троллейбуса или автобуса).

Гибридная силовая установка должна быть построена по принципу минимального использования мощности ЭУ в момент разгона. Основная часть мощности при разгоне должна обеспечиваться накопителем [2]. Такая система позволит свести к минимуму потери при заданных динамических свойствах ТС. Номинальная мощность источника должна быть, по возможности, ма-

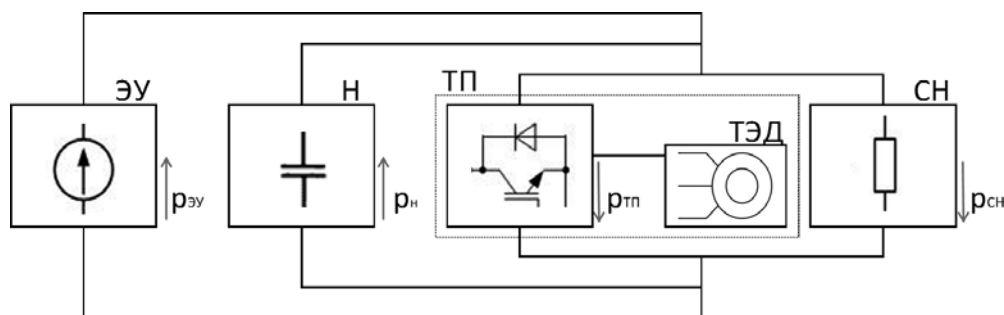


Рис. 1. Структурная схема гибридного привода последовательного типа.

ЭУ — энергетическая установка, включает первичный источник энергии: тепловой двигатель (ТД) и генератор; ТП — тяговый электрический преобразователь с подключенным тяговым электродвигателем ТЭД; Н — накопитель энергии; СН — потребители собственных нужд. Рядом с каждым компонентом обозначена потребляемая или вырабатываемая удельная мощность. Направления стрелок соответствуют направлениям токов, при которых значение удельной мощности в уравнениях принимает положительные значения: $p_{ЭУ}$ — удельная мощность энергетической установки, принимает только положительные значения; $p_{н}$ — удельная мощность накопителя энергии. Положительному значению $p_{н}$ соответствует режим разряда накопителя; $p_{тп}$ — удельная мощность, потребляемая (вырабатываемая) тяговым электроприводом. Положительному значению $p_{тп}$ соответствует режим тяги, а отрицательному — режим рекуперационного торможения; $p_{сн}$ — удельная мощность, потребляемая для обеспечения собственных нужд, принимает только положительные значения. Источник механической энергии и генератор представляют собой энергетическую установку (ЭУ), которая в длительном режиме пополняет энергией накопитель. В режиме пуска энергия от накопителя поступает к тяговому двигателю, обеспечивая заданные динамические показатели. В режиме торможения рекуперированная энергия аккумулируется в накопителе, который служит энергетическим буфером всей ГСУ [1]

лой при условии соблюдения энергетического баланса с учетом собственных нужд.

Управление гибридной системой построено с таким расчетом, чтобы тепловой двигатель постоянно работал в зоне максимального КПД ($\eta \approx 40\%$) без резких изменений частоты вращения коленчатого вала [1].

Проектирование систем гибридного привода сводится к расчету параметров основных компонентов привода [4]:

- мощностей тягового электродвигателя и других его параметров, в также энергетической установки;

- номинального напряжения тяговой цепи;

- мощности накопителя энергии либо значения номинального тока заряда и разряда;

- количества запасаемой накопителем электроэнергии в диапазоне рабочих напряжений (энергоемкости накопителя).

При рассмотрении общих принципов расчета параметров электрооборудования принимаются следующие допущения:

- мощность энергоустановки принимается постоянной во всех режимах движения независимо от напря-

жения накопителя энергии, что соответствует оптимальному режиму работы ТД;

- реализация режима постоянства мощности тягового привода не зависит от изменения напряжения на выходе накопителя, что обеспечивается алгоритмом управления тяговым преобразователем.

В настоящее время имеется возможность создания тяговых приводов для транспортных средств различного класса вместимости от особо малого до особо большого. Поскольку в заданном цикле работают машины всех классов вместимости, то с точки зрения расчета, различие этих транспортных средств заключается в величине массы (веса). Значения же всех факторов, влияющих на результаты расчета, также пропорциональны массе, поэтому расчет вполне может быть выполнен в удельных единицах по отношению к полному весу: кДж/кН, кВт/кН и т.д. Принято выделять пять классов вместимости: особо малый (ОМВ), малый (МВ), средний (СВ), большой (БВ) и особо большой (ОБВ). Прототипы транспортных ТС классов, значения полных веса и массы каждого сведены в табл. 1.

- Для учета потерь в различных звеньях привода (трансмиссия, ТЭД, тяговый преобразователь, накопи-

Таблица 1

Примерные весовые и массовые показатели транспортных средств различного класса

Наименование параметра	Класс ТС				
	ОБВ	БВ	СВ	МВ	ОМВ
Прототип ТС	Тролза-6206	ВМЗ-5298-01	ПАЗ-3237	REAL	ГАЗ-3321
Полная масса, т	26,0	18,2	10,2	7,0	3,5
Полный вес, кН	254,8	178,2	100,5	68,2	34,3

тель энергии) необходимо использовать значения КПД этого оборудования. Однако на стадии расчета эти значения точно неизвестны, хотя находятся в определенных пределах. Значения КПД трансмиссии, тягового преобразователя, ТЭД и накопителя, определенные на основе опыта эксплуатации троллейбусов, приведены в табл. 2:

Исходным показателем для расчета перечисленных параметров является характеристика цикла движения [4]. Под циклом движения ТС понимается совокупность параметров, определяющих работу машины на линии: длина перегона, скорость сообщения, время остановки, величины ускорений и замедлений, допустимые уклоны. При проектировании тягового электропривода целесообразно задаться минимум двумя циклами — стандартным и критическим.

Стандартный цикл характеризует наиболее нагруженный режим работы ТС на горизонтальном участке, определяется характером местности, заданной интенсивностью движения длиной перегона и продолжительностью остановок. Компоненты тягового электропривода рассчитываются с целью обеспечения максимальной энергоэффективности ГСУ в целом. Наиболее распространенным для рассматриваемых ТС является городской цикл движения троллейбуса [3]. Характеристики стандартного цикла представлены в табл. 3.

Параметры стандартного цикла используются для расчета параметров элементов и узлов электрооборудования, а также выбора уставок токов и напряжений, задающих значения ускорения и замедления. Все расчеты выполняются для ТС, имеющих полную массу, что соответствует максимальному заполнению пассажирского салона. Наглядное описание стандартного цикла приведено в диаграммах зависимостей $v(t)$ и $v(s)$, изображенных на рис. 2, 3.

Хотя стандартный цикл и характеризует наиболее вероятный режим движения, практически всегда существуют отклонения, ужесточающие требования к

Таблица 3

Параметры стандартного цикла движения

Наименование параметра	Значение параметра
Длина перегона	350 м
Скорость сообщения	23 км/ч
Максимальное значение ускорения и замедления	1,5 м/с ²
Продолжительность остановки	10 с
Среднее значение уклона	0,3%
Запас времени на нагон, не менее	10%

Таблица 2

Средние значения КПД основных компонентов тягового электропривода

Среднее значение КПД	Значение
трансмиссии, $\eta_{ЗП}$	0,85
тягового преобразователя, $\eta_{ТП}$	0,97
ТЭД, $\eta_{ТЭД}$	0,93
накопителя, $\eta_{н}$	0,85

электрооборудованию: главным образом, затяжные подъемы и требования к запасу времени на нагон. Для расчета параметров, учитывающих эти факторы, введем понятие критического цикла движения.

Критический цикл движения характеризует наиболее нагруженный режим для энергоустановки на затяжных уклонах, в котором транспортное средство должно работать длительно с заданной скоростью сообщения. Значения ускорения и замедления от электрического тормоза могут отличаться от таковых в стандартном цикле. Параметры критического цикла используются для расчета мощности энергоустановки, мощности и энергетической емкости накопителя энергии и оптимизации их параметров. Энергоустановка, накопитель энергии, а также тяговый двигатель и преобразователь должны обеспечить движение ТС в условиях критического цикла.

В общем случае наиболее нагруженному режиму соответствует движение на подъеме. Его величина рассчитывается исходя из рельефа местности, для которой разрабатывается транспортное средство. В отсутствие специально оговоренных требований, обусловленных рельефной местностью, целесообразно принять эквивалентный подъем 30 %. Данное значение должно быть проверено и при необходимости скорректировано по итогам испытаний натурного образца в соответствии с

Таблица 4

Параметры критического цикла движения

Наименование параметра	Значение параметра
Длина перегона	350 м
Скорость сообщения	23 км/ч
Максимальное значение ускорения и замедления	1,5 м/с ²
Продолжительность остановки	10 с
Преодолеваемый в длительном режиме подъем	30 %
Скорость, установившаяся на затяжном подъеме, не менее	43 км/ч

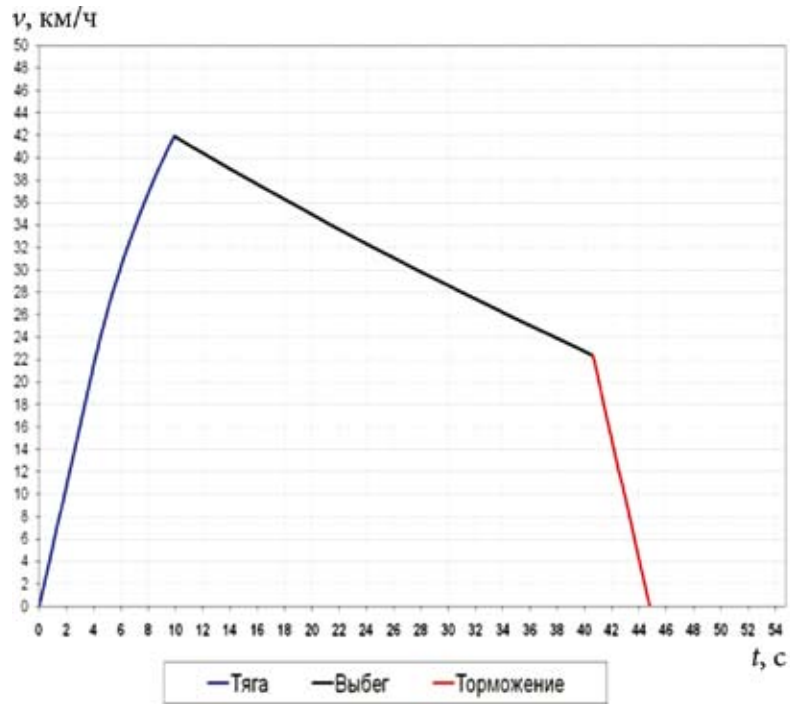


Рис. 2. Кривая движения $v(t)$ в стандартном цикле

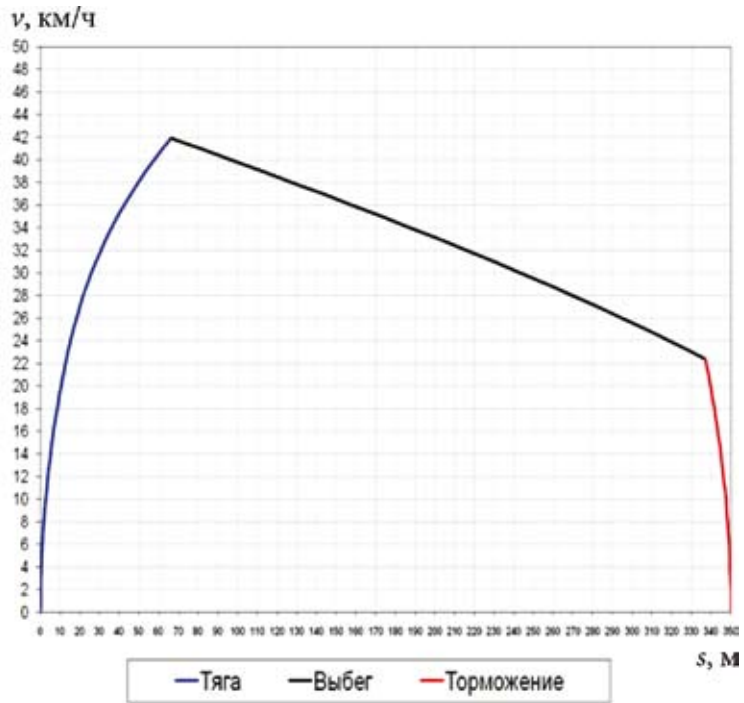
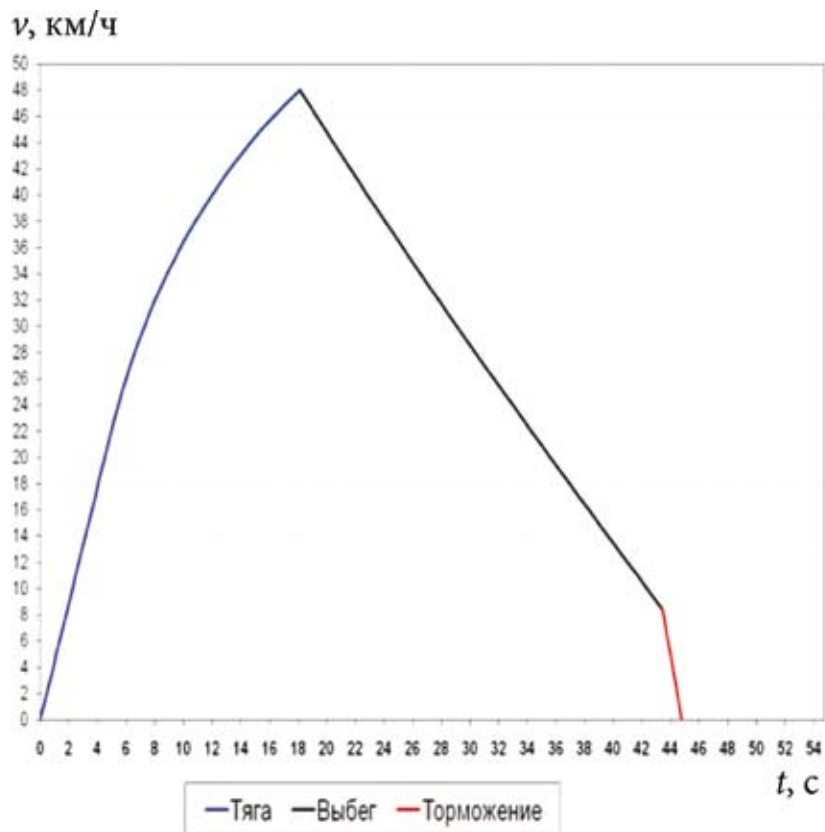
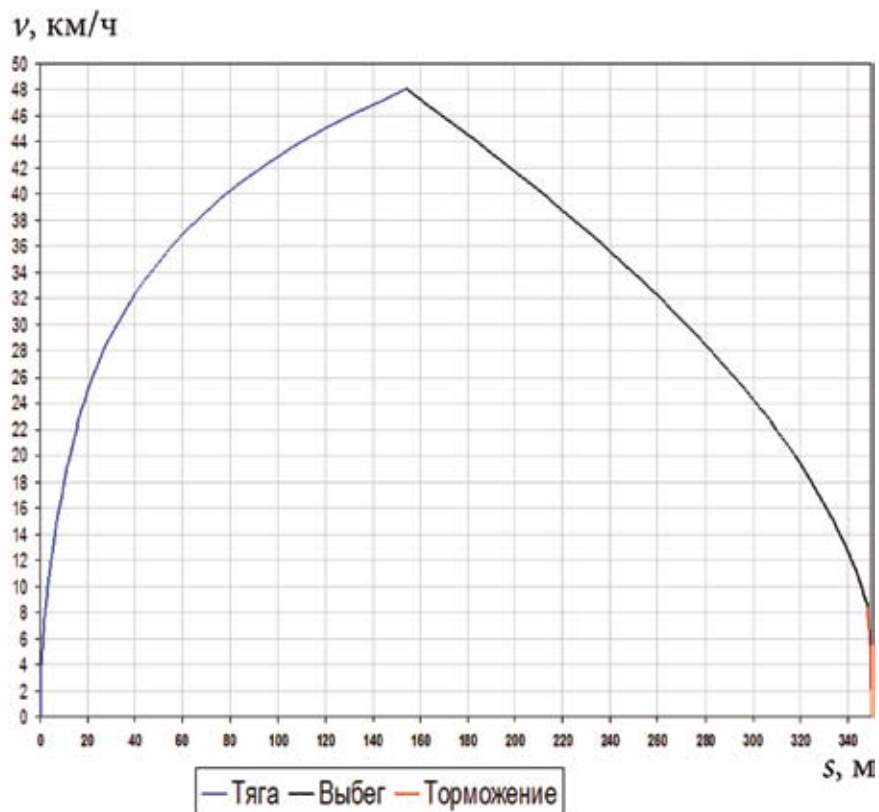


Рис. 3. Кривая движения $v(s)$ в стандартном цикле

Рис. 4. Кривая движения $v(t)$ в критическом циклеРис. 5. Кривая движения $v(s)$ в критическом цикле

заданными условиями эксплуатации. Таким образом, в общем случае критическому циклу соответствует движение на подъеме с сохранением стандартной длины перегона и скорости сообщения. Характеристика критического цикла приведена в табл. 4.

Наглядное описание стандартного цикла приведено в диаграммах зависимостей $v(t)$ и $v(s)$, изображенных на рис. 4, 5.

В случае работы ТС на затяжных уклонах (более 350 м), нужно проверять параметры энергоустановки, включая накопитель энергии, на возможность принятия энергии рекуперации и разряда накопителя энергии не ниже допустимого уровня.

Расчет параметров электрооборудования основан на определении расхода энергии транспортным средством, работающего при максимальной загрузке в условиях критического цикла движения. Исходными данными являются параметры цикла, не зависящие от класса вместимости транспортного средства, что позволяет применить универсальную методику для расчета энергетической установки, накопителя, тягового электродвигателя и тягового преобразователя.

Литература

1. **Федцов В.В.** Автобус с гибридной силовой установкой // Альманах современной науки и образования. 2009. № 12 (31). Ч. I. С. 126 — 131.

2. **Глушенков В.А., Румянцев М.В.** Тяговый привод транспортных средств с конденсаторным накопителем // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: Труды II Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2007. Ч. 2. С. 105 — 108

3. **ГОСТ 7495—1974.** Троллейбусы городские однопэтажные пассажирские. Технические требования.

4. **Глушенков В.А., Румянцев М.В.** Электрооборудование дуобуса с накопителем энергии // Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты: Труды XII Междунар. конф. М.: Изд-во МЭИ, 2008.

Статья поступила в редакцию 08.04.2016