

ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД В ГИБРИДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ.

Часть 5. Разработки КТЭО для гибридных транспортных средств в Концерне «РУСЭЛПРОМ»

СТАНИСЛАВ ФЛОРЕНЦЕВ, ген. директор, ООО «Русэлпром-электропривод»
ДМИТРИЙ ИЗОСИМОВ, зам. ген. директора по науке, ООО «Русэлпром-электропривод»
ЛЕВ МАКАРОВ, ген. конструктор, ООО «Русэлпром»
АНДРЕЙ ЗАЙЦЕВ, гл. конструктор, ОАО «Русэлпром-НИПТИ ЭМ»¹
ДМИТРИЙ ГАРОНИН, техн. директор, дивизион «Русские автобусы группа ГАЗ»

Окончание. Начало см. в ЭК11, 2009 г.

ТЯГОВОЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ АВТОБУСА ЛИАЗ 5292ХХ

Комплект тягового электрооборудования автобуса ЛИАЗ 5292ХХ включает:

- МГ (асинхронный двигатель);
- ТАД (асинхронный двигатель);
- СП МГ, СП ТАД (силовые преобразователи с микропроцессорной системой управления);
- буферный накопитель;
- контроллер верхнего уровня (КВУ) для управления потоками мощности и тягой с органами управления и отображения информации в кабине водителя;
- системы охлаждения электрических машин и силовых преобразователей;
- системы питания собственных нужд.

Силовые преобразователи выполнены на интегральных интеллектуальных силовых преобразователях SKAI фирмы SEMIKRON. Максимальный эффективный фазный ток каждого модуля 300 А

(длительно), максимальное напряжение звена постоянного тока — 900 В. Управление ТАД и МГ реализовано на контроллерах на базе процессоров серии TMS 320 (векторная система управления).

Силовые преобразователи объединены в блок силовой электроники (БСЭ) (см. рис. 4). Охлаждение блока силовой электроники жидкостное. Охлаждение МГ и ТАД — воздушное, принудительное. В последующем планируется применять жидкостное охлаждение электрических машин. Установка КТЭО не потребовала переработки конструкции автобуса. ТАД, МГ и блок силовой электроники расположены в заднем свесе автобуса, рядом с ДВС (см. рис. 5), буферный накопитель — на крыше. В качестве накопителей используются суперконденсаторы компании MAXWELL, 21 Ф, 750 В (см. рис. 6). Батареи накопителя имеют последовательно-параллельное соединение модулей и укомплектованы управляющим контроллером для обеспечения контроля за состо-

янием всех модулей накопительной батареи. Контроллер разработан ООО «Русэлпром-электропривод». Схема контроллера и программное обеспечение позволяют управлять процессами заряда/разряда накопительной батареи и вести контроль следующих параметров:

- текущее напряжение накопителя (с точностью до 0,5 В);
- текущее напряжение каждой из емкостей в сборке (с точностью до 0,2 В);

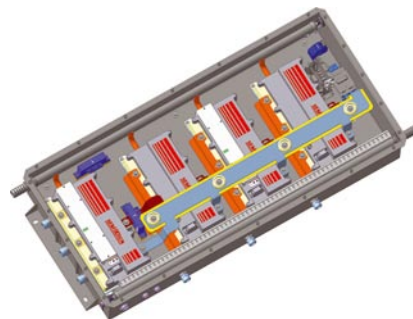


Рис. 4. Блок силовой электроники с SKAI фирмы SEMIKRON



Рис. 5. Расположение ДВС, МГ и ТАД на автобусе



Рис. 6. Буферный накопитель — батарея суперконденсаторов Maxwell, 21 Ф, 750 В

¹ В разработке устройств КТЭО и транспортных средств принимали участие сотрудники Концерна «Русэлпром» и предприятий-изготовителей конкретной транспортной техники.

- симметричность заряда емкостей;
- температура окружающей среды;
- температура каждого модуля батареи накопителя.

Применение специализированных алгоритмов позволяет вести контроль над внутренним сопротивлением накопителя, учитывая его в балансе мощностей.

Тяговый электродвигатель (ТАД) развивает кратковременную мощность 250 кВт, что превышает мощность штатного дизеля серийного прототипа — автобуса ЛиАЗ 5292 (180 кВт), обеспечивая тем самым достойную динамику при разгоне. Долговременная мощность ТАД соответствует долговременной мощности МГ и ДВС — 125 кВт. Пониженная (по сравнению с прототипом) мощность используемого в гибридном автобусе дизеля (Cummins ISBe4+185, 136 кВт, EBPO-4) достаточна для движения в городском цикле и равномерного движения на скоростях вплоть до 80...90 км/ч, а недостаток мощности при разгоне емкостным накопителем. В то же время снижение мощности дизеля — одна из составляющих экономии топлива.

Другой составляющей экономии топлива, возможной для последовательной схемы, является оптимизация статического режима работы дизеля. В соответствии с необходимой для ТАД мощностью выбирается такое соотношение момента ДВС и скорости его вращения, которое обеспечивает наилучшую топливную экономичность. Распределение энергии осуществляется алгоритмом управления потоками мощности, который обеспечивает основную экономию топлива за счет следующих факторов:

- во-первых, необходимая для ТАД мощность разделяется на быстропеременную и медленно меняющуюся составляющие, первая из которых поставляется накопителем, вторая — ДВС; тем самым обеспечивается работа ДВС в режиме, близком к стационарному. При этом минимизируется также токсичность выхлопа.
- во-вторых, накопитель может принимать энергию рекуперации при торможении, обычно теряемую в механических тормозах; это особенно существенно для маршрутных транспортных средств с относительно частыми остановками (городские автобусы).

Управление потоками мощности является функцией КВУ, он же осуществляет управление движением, включая логическую обработку входных сигналов кабины водителя, датчиков, измерение аналоговых сигналов, управление режимами движения автобуса, а также обработку и фиксацию аварийных ситуаций. КВУ имеет четыре независимых CAN-интерфейса передачи данных, широко применяемого в автомобильной промышленности. Два из CAN-интерфейсов работают по протоколу CANOpen и осуществляют связь с контроллерами мотор-генератора, тягового двигателя, накопителя и табло водителя со скоростью 1 Мбит/с. По ним КВУ получает всю необходимую информацию и осуществляет управление элементами электрической трансмиссии. Третий канал CAN работает по протоколу SAE J1939 со скоростью 250

Кбит/с. Контроллер верхнего уровня включен в общую сеть J1939 автобуса и имеет возможность получать всю информацию о состоянии ДВС, контроллеров ABS и ASR. По данному каналу связи КВУ посылает задание частоты вращения ДВС. Контроль над основными параметрами и аварийными ситуациями ДВС возложен на КВУ. Если один из параметров вышел за допустимые границы или произошла аварийная ситуация, то КВУ выдает предупреждающее сообщение на табло водителя. КВУ ведет запись в энергозависимую память состояния всех органов управления, исполнительных устройств, а также уставок ПО управления через определенные, относительно небольшие моменты времени. На пункте технического обслуживания инженеры могут увидеть всю последовательность действий водителя при работе. При возникновении аварийной ситуации в контроллерах МГ и ТАД осуществляется запись соответствующего аварийного лога во внутреннюю память этих контроллеров. Впоследствии информация о развитии аварийной ситуации по каналу CAN считывается и записывается в КВУ с кодом этой ситуации. КВУ также записывает свой лог, предшествующий аварийной ситуации. Это позволяет иметь полную картину состояний всех устройств электрической трансмиссии за несколько секунд до аварии и выявить причину неисправности. Аварийные логи могут быть переписаны в сервисную вычислительную систему для сохранения их на внешнем носителе; с помощью СВС можно получить графики поведения того или иного параметра системы перед аварией.

Основными режимами перемещения автобуса являются движение вперед, назад и парковка (удержание автобуса в определенном положении). Имеется режим стабилизации текущей скорости и два уровня ограничения скорости (60 и 20 км/ч). В режиме аварийного движения возможно продолжение движения в ряде некритических аварийных ситуаций, однако возможности управления при этом ограничены (нет стабилизации скорости) и ограничена скорость движения. Педаль тормоза объединяет две тормозные системы — электрическое торможение с рекуперацией (в начале хода педали) и механическое торможение (в конце хода педали). Электрическое торможение может осуществляться до полной остановки автобуса; более того, при этом автоматически выполняется переход к режиму парковки, и автобус удерживается в одном положении без нажатия на педаль тормоза или включения стояночного тормоза (даже на спуске или подъеме). Для возобновления движения достаточно нажать на педаль газа.

Структура программного обеспечения КВУ показана на рисунке 7.


Стоимость КТЭО при серийности более 100 комплектов в год — не более 1,5 млн. руб.

Специалистами ООО «Русэлпром-электропривод» разработано специальное программное обеспечение для сопровождения, наладки и диагностики ошибок — сервисная вычислительная система (СВС), которая предназначена для визуализации параметров рабочих характеристик КТЭО; предоставления и обработки графической информации; загрузки, сохранения и отображения в графической и табличной форме файлов аварийных логов КВУ, МГ и ТАД. Оно может быть установлено на любой персональный компьютер (минимальные требования — Windows XP; 1,4 ГГц или выше; ОЗУ 512 Мбайт, объем жесткого диска — 100 Мбайт; слот PCI-Express, 2xUSB 2.0). СВС предназначено для визуализации параметров рабочих характеристик КТЭО. Программа СВС состоит из следующих функциональных частей (экранов).


Экран «Мониторинг» — отображение таких основных параметров системы управления как:

- обороты ДВС;
- ток и момент мотор-генератора;
- напряжение и мощность накопителя;


СВЕТОДИОДЫ



光源光电
G-NOR




国星光电
NATIONSTAR



ProLight Opto
Technology Corporation



EVERLIGHT
LIGHTING FOREVER



Macroblock

ДРАЙВЕРЫ

Большой выбор
источников питания для светодиодов

8-800-333-01-73

звонок бесплатный

www.radiodetali.ru

- ток и момент ТАД;
- обороты ТАД;
- момент ДВС;
- положение педали газа;
- датчики давления педали тормоза;
- авария;
- пробой;
- перегрев;
- аварийное движение;
- аварийное отключение;
- отображение состояние и направления движения автобуса (нейтраль, вперед, парковка, назад);
- отображение параметров термозащиты (МГ, ТАД, СП ТАД, СП МГ);
- КПД электрической трансмиссии;
- состояние стояночного тормоза.

СВС позволяет в значительной мере упростить процесс наладки и контроля КТЭО, а также анализ аварийных логов, что позволяет ускорить поиск и устранение неисправностей.

СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ АВТОБУСА ЛИАЗ 5292ХХ

До установки на автобус штатный комплект тягового электрооборудования прошел наладку и всестороннее исследование на полноразмерном стенде с расширенным составом измерительных приборов. Стенд реализован в Цехе испытаний НИПТИЭМ. Блок-схема стенда приведена на рисунке 8.

Кроме штатных устройств КТЭО автобуса — МГ, ТАД, БСЭ, БН, КВУ, СВС, систем охлаждения и систем питания электроники — стенд содержит имитатор ДВС (управляемый привод переменного тока фирмы КЕВ) и имитатор нагрузки ТАД (также управляемый привод переменного тока фирмы КЕВ). Наладка оборудования стенда и проведение испытаний осуществлялись с помощью специально написанной программы — автоматизированного рабочего места (АРМ). АРМ выполняет роль задатчика скорости для ТАД и для имитатора ДВС, момента для имитатора нагрузки, а также фиксирует результаты эксперимента. При этом используются минимальные дополнительные аппаратные средства — переходник USB-CAN, данные передаются/принимаются КВУ по каналу CAN. В программе имеется возможность установить желаемый цикл движения (до 12-ти участков с задаваемой постоянной скоростью на каждом из них и с желаемыми углами наклона дороги на каждом участке). Задаются также коэффициенты сопротивления трения качения шин, аэродинамическое сопротивление и настроечный коэффициент для имитации загрузки автобуса.

После отладки и настройки оборудования были проведены:

- статические испытания КТЭО;

СТРУКТУРА ПО КВУ автобуса ЛиАЗ

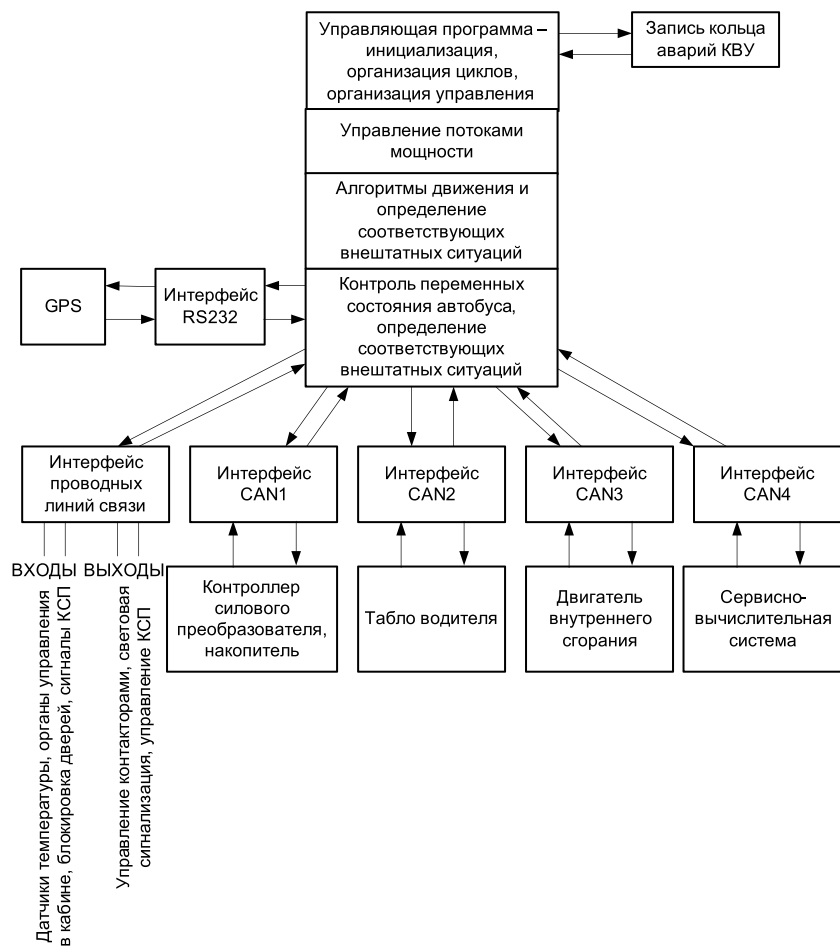


Рис. 7. Структура программного обеспечения контроллера верхнего уровня

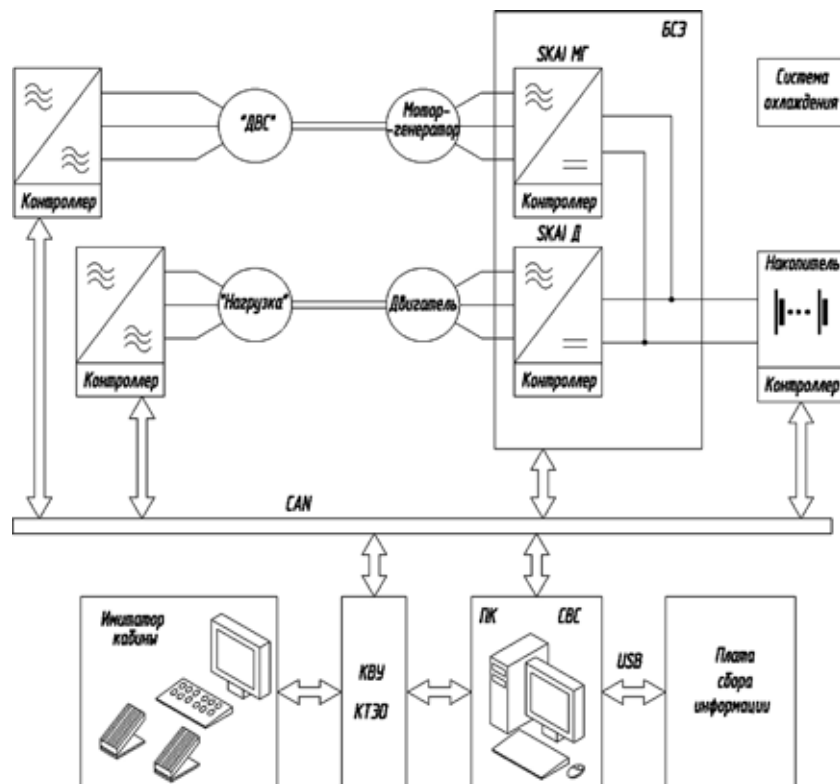


Рис. 8. Блок-схема стенда

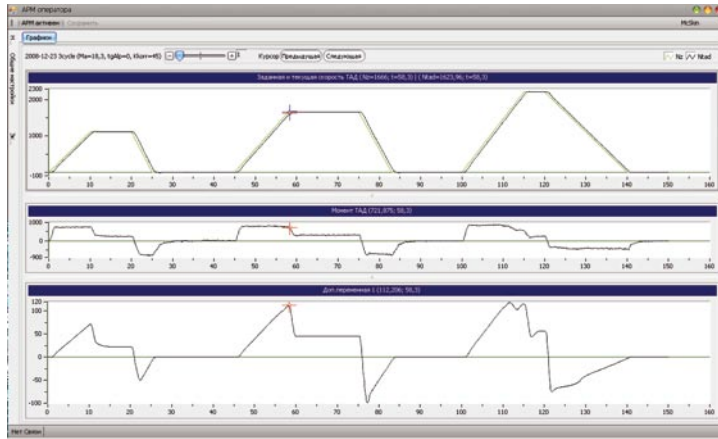


Рис. 9. Прохождение испытательного маршрута, состоящего из трех участков разгона

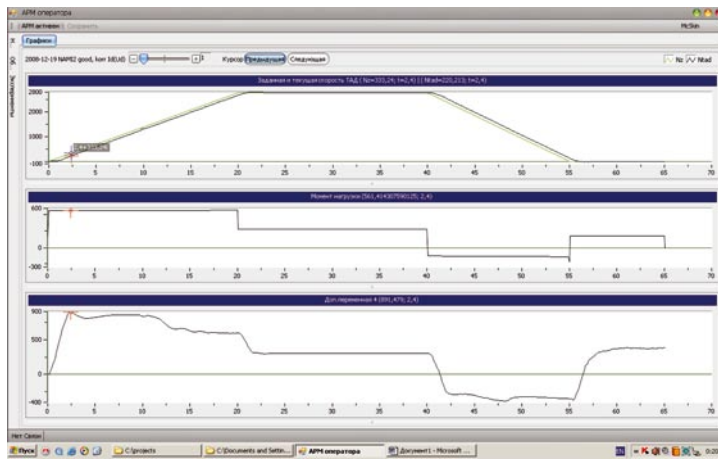


Рис. 10. Движение в цикле НАМИ II

- тепловые испытания;
- динамические испытания (имитация циклов движения автобуса);
- проверка систем защит оборудования;

- проверка системы регистрации состояния устройств.
- Момент инерции автобуса моделировался эквивалентным моментом нагрузки, рассчитываемым по задан-

Таблица 2. Варианты конденсаторных систем ЭЛТОН в сравнении с системой Maxwell

Тип системы	Вариант 2			Вариант 6
	4×6×VMOD0063-P125 Maxwell	2×25×20ЭК404 ЭЛТОН	36×10ЭК303 ЭЛТОН	36×10ЭК303 ЭЛТОН
Диапазон рабочих напряжений, В	750...375	750...375	540...270	
Емкость, Ф	42	48	139	
Запасаемая энергия, МДж	8,86	10,1	15,2	
Масса, т	1,39	1,20	1,22	
Габаритный объем, м3	2,38	0,97	0,84	
Плотность запасаемой энергии, Вт·ч/кг (Вт·ч/л)	1,8 (1,0)	2,3 (3,2)	3,4 (5,0)	
Отдаваемая энергия при мощности 360 кВт, МДж	8,2	7,4	8,2	
Время разряда при мощности 360 кВт, с	23	21	23	
Цена опытного образца с учетом НДС, млн руб.	?	3,96	3,68	
Цена при промышленном производстве, млн руб.	?	1,0—1,3	1,1—1,9	

Таблица 3. Тягово-динамические расчеты

Автобус Грузовик	Параметр	90 км/ч			Цикл НАМИ-2
		0%	10 км/ч 20%	60 км/ч 1,75%	0%
ПАЗ-3237 ЭГ «Валдай»	Мощность ДВС, кВт	92,6	86,3	89,7	28,3 (средняя)
	Мощность ТАД, кВт	85	63,1	79	165 (максимальная)
	Сила тяги, Н	3400	16700	4800	12000 (разгон)
	Момент ТАД, Нм	198,6	998	213,6	522 (разгон)
	Скорость ТАД, об./мин	5440	604	3623	3020 (50 км/ч)

ному ускорению, вместе с расчетным сопротивлением шин, силой скатывания и аэродинамическим сопротивлением. Момент нагрузки имитировался нагрузочным управляемым приводом в моментном режиме.

Результаты отдельных испытаний приведены на рисунках.

На рисунке 9 показано прохождение испытательного маршрута, состоящего из трех участков разгона до 20, 30 и 40 км/ч, соответственно, с торможением до остановки после каждого из них. На рисунке 10 показано движение в цикле НАМИ II с разгоном до 50 км/ч за 20 с при движении на подъеме 2%. Из графиков 1 следует, что желаемый график движения (заданная скорость движения, зеленый цвет) выдерживается (фактическая скорость обозначена черным цветом), хотя необходимая для этого мощность ТАД (третий график) может принимать значения, значительно превосходящие возможности МГ-ДВС. На втором графике показан момент ТАД. Таким образом, автобус со сниженной мощностью ДВС обеспечивает необходимый темп разгона и не будет являться помехой в транспортном потоке.

Были также проведены измерения КПД (совокупный КПД МГ — ТАД от вала имитатора ДВС до вала ТАД в режиме максимальной мощности составил около 0,85, что представляется достаточным для первого образца КТЭО — имеются резервы повышения КПД), проверено функционирование систем защит, проведены тепловые испытания КТЭО; МГ и ТАД выдерживают длительный режим 100 кВт (для МГ) и 750 Нм (для ТАД). В процессе стендовых испытаний КТЭО был проверен алгоритм реакций КВУ на аварийные ситуации. Испытания показали:

- время реакции КВУ на аварию составляет 3 мс;
 - время записи аварийных логов КВУ, МГ и ТАД в файлы составляет 5 с.
- В процессе отладки совместной работы СВС и КВУ получены следующие результаты:
- на основном экране СВС отображаются все основные параметры КТЭО, необходимые для контроля его работы;
 - время обновления основных параметров составляет 10 мс;
 - СВС также отображает направления потоков мощности во всей системе;
 - проверена возможность отображения параметров КВУ в виде графиков в реальном времени;
 - СВС позволяет записывать с определенной частотой и заданной длительностью данные в буфер и отображать их в виде графиков;
 - система дает возможность расчета КПД КТЭО за требуемый промежуток времени.

Стендовые испытания подтвердили соответствие основных характеристик оборудования КТЭО проектным значениям.

После завершения стендовых испытаний оборудование КТЭО смонтировано на шасси автобуса. В настоящее время концепт автобуса ЛИАЗ 5292XX проходит испытания на топливную эффективность при типовом движении по улицам города (г. Ликино).

ПРОЕКТЫ СОЗДАНИЯ ДРУГИХ ГОРОДСКИХ АВТОБУСОВ

Специалистами ООО «Русэлпром-Электропривод» проведены тягово-динамические расчеты и оценки характеристик основных силовых узлов КТЭО для ряда различных городских автобусов, выпускаемых предприятиями России и Белоруссии:

- 9-м ПА3-3237, «Богдан»;
- 12-м 4202А («Белкоммунмаш»), МА3-203;
- 15-м 627006 («Волжанин»);
- 18-м ЛиАЗ-6292, МА3-205.

Специалистами концерна «Русэлпром» выполнено проектирование всех компонентов тягового электрооборудования: электрических машин, силовой и управляющей электроники, вспомогательных систем питания и охлаждения для указанных выше различных автобусов. Предприятия концерна готовы к изготовлению комплектных КТЭО.

Что касается вариантов систем буферных накопителей, то отметим, во-первых, что «Русэлпром» проработал вариант использования отечественных суперконденсаторов (см. табл. 2).

Во-вторых, в «Русэлпром» имеются проработки использования в качестве буферного накопителя литиево-ионной аккумуляторной батареи. В качестве примера приведем тягово-динамические расчеты (см. табл. 3) автобуса ПА3-3237 и развозного грузовика «Валдай» (данные взяты из заявки, поданной «Русэлпром» в августе 2009 г. в Министерство промышленности и торговли РФ по конкурсу КД «Олимпиада»).

По этим данным определены исходные требования к электрическим машинам, ДВС и буферному накопителю, который должен обеспечить автономное движение с питанием от АБ не менее 25 км (в городском цикле движения). Емкость буферного накопителя должна быть не менее 24 кВт·ч. Характеристики литиево-ионной батареи, удовлетворяющей поставленным условиям, уже приводились ранее (см. первую статью цикла). Поскольку такая аккумуляторная батарея «привязана» к конкретному проекту транспортного средства, нелишне будет повторить ее характеристики:

- количество аккумуляторов (в т.ч. в запас) — 240 (260);
- масса 385 кг;
- максимальное зарядное напряжение — 850 В;
- минимальное разрядное напряжение — 720 В;
- энергоемкость номинальная — 30,7 кВт;
- энергоемкость в конце службы — 25 кВт;
- энергоемкость при 70% DOD в конце службы — 17,5 кВт;
- стоимость с тестированием и подбором аккумуляторов, комплектом силовых переключателей и конструктивом — 2,5 млн руб.

Таким образом, концерн «Русэлпром» готов к разработке, изготовлению и поставкам КТЭО для различных городских автобусов и развозных грузовиков в комплектации, отвечающей требованиям заказчиков. Имеющихся наработок достаточно не только для выполнения отдельных инновационных проектов, но и для модернизации, что представляется необходимым ввиду многообразия требований и условий применения транспортных средств. Сопоставляя характеристики, структуру и состав КТЭО отечественных гибридных автобусов и их зарубежных аналогов, можно с полным основанием утверждать, что отечественные производители транспортной техники в состоянии в кратчайшие сроки выйти на передовые рубежи в создании современного общественного городского транспорта нового поколения,

было бы желание. Внедрение гибридной транспортной техники может являться достойным примером инновационного выхода отрасли транспортного машиностроения из экономического кризиса. Существенно, что создание энергосберегающих, дружелюбных к окружающей среде транспортных средств возможно на коммерческой основе, без привлечения средств инновационной поддержки, хотя, разумеется, финансовая и организационная помощь государственных органов не была бы лишней.

ЛИТЕРАТУРА

1. Станислав Флоренцев, Лев Макаров, Владимир Менухов, Игорь Варакин. Экономичный, экологичный городской гибридный автобус//Электронные компоненты. №12, 2008 г. С. 1-9.
2. С.Н. Флоренцев, Д.Л. Гаронин, И.К. Воробьев, Л.И. Гордеев. Городской маршрутный автобус ЛИАЗ 5292XX с комбинированной энергоустановкой. Часть I. Общие характеристики автобуса ЛИАЗ 529XX. Электротехника. №7. 2009 г. С. 20-25.
3. Д.Б. Изосимов, С.В. Журавлев, С.В. Байда, А.А. Белоусов. Городской маршрутный автобус ЛИАЗ 5292XX с комбинированной энергоустановкой. Часть II. Стендовые испытания комплекта тягово-энергетического оборудования автобуса ЛИАЗ 529XX. Электротехника. №8. 2009 г. С. 2-7.
4. Stanislav N. Florentsev. From Russia with Automotive. AC electric drive-train of a hybrid city bus//Power System Design Europe (PSDE). July/August 2009. P.50-51.
5. Stanislav N. Florentsev. Traction Electric Equipment Set for AC Electric Transmission Various Vehicles//Proceedings of International Exhibition & Conference "Power Electronics, Intelligent Motion. Power Quality" (PCIM-2009). 12-14 May 2009. Nuremberg. Germany. P. 625-627.
6. Изосимов Д.Б., Флоренцев С.Н. Комплекты тягового электрооборудования (КТЭО) транспортных средств. Международный научно-практический семинар «Проблемы и тенденции развития автоматизированного электропривода», Москва, Экспонентр, 10.06.2008 г.