

ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД В ГИБРИДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ.

Часть 4. Разработка 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-НИПТИЭМ»
ДМИТРИЙ ГАРОНИН, техн. директор, дивизион «Русские автобусы группа ГАЗ»

В четвертой части этой статьи (начало см. в ЭК11, 2009) рассматриваются вопросы типажа, разработки, производства и эксплуатации гибридных автобусов. Указываются ведущие фирмы-производители оборудования для гибридных автобусов. Приводятся характеристики городского автобуса ЛИАЗ 5292ХХ с гибридной энергоустановкой – совместной работы концерна «Русэлпром» и Ликинского автобусного завода. По итогам Международного автотранспортного форума, Москва, 2008 г., этот автобус был признан лучшим автобусом года в России.

Анализ мировых тенденций развития транспортных систем показывает, что совершенствование мобильной техники осуществляется в направлении энергосбережения, ресурсосбережения и создания машин с экологически безопасными параметрами. Важность применения экологически чистых энергосберегающих транспортных средств в мегаполисах России очевидна.

Основным критерием создания новой отечественной транспортной техники становится ее конкурентоспособность по отношению к традиционным и гибридным транспортным средствам зарубежных производителей. Из анализа множества альтернативных вариантов следует: реальной возможностью в настоящее время создать экологически чистое (или, по крайней мере, мало загрязняющее окружающую среду) конкурентоспособное транспортное средство является использование комбинированной энергоустановки (КЭУ) на базе двигателя внутреннего сгорания, генератора, тягового электропривода с буферным накопителем. В КЭУ удается совместить положительные свойства отдельных источников: высокую удельную энергию источника энергии и высокую удельную мощность буферного источника. Приоритетными являются комбинированные энергоустановки с тепловыми двигателями, а в перспективе — энергоустановки на основе топливных элементов. Эффективность

применения КЭУ с буферным накопителем, в принципе, тем выше, чем чаще повторяются разгоны и торможения в типовом движении транспортного средства. Типичным примером транспортного средства, движение которого характеризуется повторяющимися разгонами и торможениями, является городской маршрутный автобус, который при движении не только останавливается по сигналу светофоров, но и на остановках для высадки и посадки пассажиров. Эффективность применения КЭУ обусловлена:

- большим различием средней и пиковой мощности, требуемой для движения (отношение до 1:5 и выше);
- большим различием удельных показателей энергии и мощности бортовых источников, составляющих КЭУ.

Важным фактором снижения расхода топлива является рекуперация энергии торможения вместо ее теплового рассеивания и работа ДВС в стационарном экономичном режиме, что так же значительно снижает величину токсичных выбросов в выхлопе ДВС. Работа городских автобусов с большим числом остановок представляет идеальные условия для использования энергии торможения. Автобусы в основном используются на низких скоростях, и очень часто за разгоном почти сразу следует торможение и остановка. В обычных автобусах кинетическая энергия в основном преобразуется в неиспользуемое тепло, в то

время как гибридные автобусы, трогаясь после остановки, используют только преобразованную энергию, которая выделяется при торможении. До 45% всего времени работы городских автобусов приходится на остановки, где автоматическая система стоп-и-старт помогает сохранять дорогостоящее топливо.

ГИБРИДНЫЕ АВТОБУСЫ В МИРЕ

Указанные преимущества давно известны мировым производителям автобусов. Не случайно, что продажи серийных гибридных городских автобусов начались еще в 1991 г. Пионером, как и в продвижении легковых гибридных автомобилей, стала корпорация Toyota. Ее дочерняя компания Hino выпустила гибридный городской автобус Hino Blue Ribbon City Hybrid. Автобус был оборудован собственной разработкой Hino — параллельной гибридной трансмиссией H1MR, в которой пятиступенчатая коробка передач сочеталась с асинхронным мотор-генератором, а в качестве накопителя энергии использовались NiMH-батареи. Позже подобной трансмиссией был оборудован и туристический автобус люкс-класса S'elega R. С 1997 г. и по настоящее время лидером в количестве коммерчески используемых гибридных автобусов являются США и Канада. Только в США продано более 6000 гибридных автобусов

различных производителей, причем удалось несколько уменьшить разницу в цене гибридного и обычного автобуса. Например, в 2007 г. самый массовый американский гибридный автобус Orion VII Hybrid стоил 385 тыс. долларов, а газовый аналог — 313 тыс. долларов. Это продукт концерна Daimler, владеющего североамериканским производителем автобусов Orion Bus. В его основе — последовательная гибридная трансмиссия, созданная американо-британским аэрокосмическим и оружейным концерном BAE Systems. Система включает в себя синхронный генератор с постоянными магнитами и асинхронный тяговый двигатель в комплекте с силовыми преобразователями на IGBT, контроллером и свинцово-кислотными батареями Hawker. Электрические машины и силовой преобразователь имели масляное, а контроллер — водяное охлаждение. Надо отметить, что с 2008 г. продается уже второе поколение систем гибридного тягового привода BAE Systems. Их отличает применение более экологически чистого дизеля (Евро-4 с EGR), единой масляной системы охлаждения всех элементов привода, нового ПО контроллера, замена свинцово-кислотных батарей на литиево-ионные A123Systems. Последовательной гибридной трансмиссией BAE пользуются и другие производители автобусов — канадская фирма New Flyer, британская Alexander Dennis, японская Isuzu тоже испытывает новый 9-м автобус Erga с гибридной схемой BAE Systems.

В США и Канаде активную материальную и организационную поддержку внедрению инновационных и экологичных городских автобусов оказывают власти всех уровней и общественно-коммерческие объединения и организации. Крупные города США и Канады сотнями закупают такие гибридные автобусы, так что в настоящее время в эксплуатации уже находится свыше 2200 таких автобусов, и планируются поставки покупателям не менее 850 шт. в ближайшем будущем (2010—2011 г.). Стоимость владения такими автобусами сравнялась и даже стала ниже стоимости владения газовыми автобусами, которые ранее считались экономичной и более экологически чистой альтернативой дизелю. Характерен следующий пример. Власти Нью-Йорка отказались от закупки около 200 газовых автобусов, направив выделенные средства на закупку гибридных автобусов. Позднее власти приняли решение перейти полностью на закупку гибридов, аргументируя это тем, что при сходных экологических показателях дизель-электрические автобусы

более экономичны и дают существенные преимущества в эксплуатации и комфорте, не требуют дополнительной инфраструктуры, а разница в цене довольно быстро окупается.

Основными компаниями, производящими комплектное тяговое электрооборудование различных типов для гибридных автобусов, являются:

- **E⁴⁰ и E⁵⁰** фирм General Motors/Allison Transmission (разработка совместно с Daimler Chrysler и BMW) — смешанная параллельная схема (Split). Это самая массовая на сегодняшний день трансмиссия — комбинированная последовательно-параллельная схема, которая объединяет в составе трансмиссии 2 асинхронных электрических машины, 3 планетарных передачи и 2 синхронных муфты. Каждая из электрических машин может работать как в генераторном, так и в двигательном режиме. В состав трансмиссии входит также сдвоенный силовой преобразователь на IGBT, контроллер и NiMH-батарея Panasonic. Электромашины, силовые преобразователи и контроллер имеют общую систему водо-масляного охлаждения. В 2009 г. появилось второе поколение таких трансмиссий, рассчитанное на работу с более экологически чистыми двигателями (Евро-4), с обновленными силовым преобразователем и контроллером, новым ПО, вторым поколением батарей. У некоторых производителей гибридных автобусов вместо аккумуляторных батарей в качестве накопителей использованы суперконденсаторы. Они имеют большой ресурс и большую удельную мощность, меньшую стоимость;

- **Eaton Fuller[®] UltraShift[®] Hybrid** фирмы Eaton Corp. — параллельная схема;

- **HIMR I и II** фирм Toyota-Hino — смешанная параллельная схема (Split);

- **I-SAM[®]** фирмы Volvo — параллельная схема;

- **ELVO[®]** фирмы Voith — последовательная схема;

- **Mitsubishi** — последовательная схема (только для рынка Японии);

- **Vossloh Kiepe** — последовательная схема. В качестве накопителя энергии используются суперконденсаторы Maxwell.

- **TheWheel™** фирмы E-Traction — последовательная схема;

- **ELFA[®]** фирмы Siemens Automation&Drives — последовательная схема. Это универсальная система, используемая для построения последовательных гибридных электротрансмиссий для автобусов. Она включает в себя:

- электрические машины водяного охлаждения (асинхронные и синхронные с постоянными магнитами) в широком диапазоне мощностей, исполь-

зуемые в качестве генераторов или тяговых (вспомогательных) двигателей;

- сдвоенные силовые IGBT-преобразователи (инвертор+инвертор или инвертор+чоппер) водяного охлаждения;

- контроллеры для управления комплектом тягового оборудования;

- дополнительные электрические (специальные дроссели) и механические (редукторы, сумматоры, оси) оборудование.

При очевидном достоинстве универсальности системы Elfa[®], ее недостатком является отсутствие системной интеграции для конкретного транспортного средства, например гибридного автобуса.

- **HybriDrive[®] Gen. I и II** фирмы BAE Systems — последовательная схема;

- **CEU 90, 120, 240** фирмы Enova Systems — последовательная схема. Американская компания Enova Systems производит асинхронные электрические машины, силовые IGBT-преобразователи, контроллеры, комплектует свои системы редукторами, накопителями энергии на основе аккумуляторов или суперконденсаторов. Компании удалось добиться значительного продвижения на рынке Юго-Восточной Азии. В частности, она активно сотрудничает и имеет совместное предприятие с Hyundai, в гибридных автобусах которой используются комплекты Enova.

Несколько особняком от основного течения в разработке трансмиссий для городских гибридных автобусов стоят американская компания Eaton и американо-шведский концерн Volvo. Эта трансмиссия представляет собой сочетание 6-скоростной автоматизированной коробки передач и мотор-генератора с постоянными магнитами Hitachi и Li-ion герметичной батареи того же производителя.

Таким образом, в мире существует около десятка разработчиков полных комплектов тягового электрооборудования для гибридных автобусов, из которых в нашем обзоре приведены лишь наиболее крупные. Количество производителей отдельных компонентов или групп компонентов, компаний-интеграторов больше на порядок. Что же касается производителей автобусов, можно сказать, что для них вопрос наличия в их производственной линейке гибридного автобуса является вопросом престижа. Производитель, не имеющих гибридных моделей, в развитых странах рассматривается как своего рода компания «второго сорта». Это подтверждают и крупные выставки производителей транспорта, имевшие место в 2009 г. — UITP в Вене и BusWorld в Кортрейке.

Для Европы переломным должен стать 2010 г., в котором в серийное производство поступят сразу несколько моделей гибридных автобусов у ведущих производителей, а также начнутся массовые продажи целого ряда одно- и двухэтажных моделей британских производителей.

Рассмотрим более подробно современный городской гибридный автобус на двух примерах.

Гибридный низкопольный городской автобус MAN Lion's впервые был представлен на международном конгрессе транспортных компаний UITP в 2008 г. в Хельсинки NEOMAN Bus Group, а также отделом автобусов MAN Nutzfahrzeuge AG. Запуск серийного производства автобусов, которое начнется с небольшого парка для заказчиков, запланирован на 2010 г. В гибриде Lion's City компания MAN использовала множество средств, которые позволяют значительно снизить расход топлива. Стефан Кершл (Stefan Kersch), разработчик автобусов и менеджер проекта, заявляет о снижении расхода топлива минимум на 20—25% и о значительном сокращении выхлопных газов. Эти факты также подтверждаются великолепными результатами работы в транспортной компании VAG предыдущей модели автобуса, который прошел более чем 30 тыс. км, обслуживая пассажиров Нюрнберга.

Выбор суперконденсатора в качестве буферного накопителя этой модели разработчики объясняют тем, что он отличается особенно высокой величиной плотности рассеиваемой мощности, объемом сохраняемой энергии, надежностью и повышенной эффективностью. Отсутствие массопереноса и необходимости в сервисном обслуживании — еще два фактора, которые позволяют говорить об экономической эффективности суперконденсаторов. С точки зрения весового баланса, решение с использованием суперконденсаторов превосходит вариант с аккумуляторными батареями, поскольку низкопольный автобус с суперконденсаторами, которому не требуются более тяжелые батарейные блоки, практически сравнивается по массе с городскими автобусами на природном газе. Не менее важен и тот факт, что улучшенная система воздушного охлаждения обеспечивает в среднем такой же эксплуатационный ресурс суперконденсаторов, как и срок службы серийных автобусов (в отличие от аккумуляторных батарей любого существующего типа).

Полноразмерный низкопольный городской гибридный автобус Scania (см. рис. 1) — удобный и комфортабельный, подходит для стесненных городских условий благодаря велико-



Рис. 1. Гибридный автобус Scania

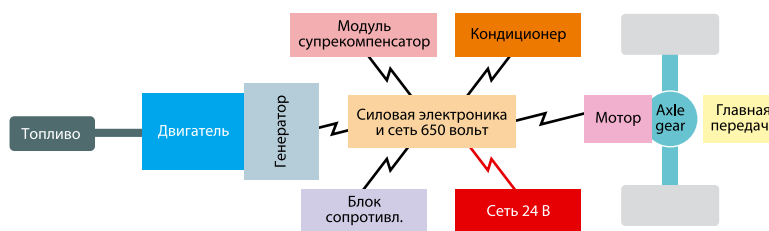


Рис. 2. Блок-схема КТЭО автобуса Scania

лепной маневренности, снижает суммарные выбросы CO2 почти на 90%, если заправлен этанолом, и достигает экономии топлива почти в 25%. Концепция автобуса с гибридным приводом фирмы Scania создана для формирования устойчивой автобусной системы. Она спроектирована для того, чтобы быть рентабельной на основании собственных достоинств, не считывая на стимулы при покупке или при эксплуатации. Дополнительная стоимость продукции компенсируется добавленной покупательской стоимостью и пониженными эксплуатационными расходами.

Гибридная силовая установка Scania (см. рис. 2), выполненная по последовательной схеме, является результатом трехлетнего проекта по разработке, которую проводил Технический центр фирмы Scania в Седерталье, Швеция. Не требуется использования дополнительных понижающих передач в связи с большим рабочим диапазоном тягового двигателя (0–2400 об./мин, полный крутящий момент 2750 Нм при пуске).

Охлаждение электрических машин — жидкостное; буферного накопителя — воздушное.

Блок ДВС — генератор установлен в шумозащищенном кожухе. Специально сконструированная шумоизолирующая стенка отделяет пассажирское отделение от заднего модуля. Воздух для систем охлаждения передается по отдельным шумозащищенным воздуховодам. Уровень внешнего шума снижен до 75 дБ.

ГИБРИДНЫЙ АВТОБУС ЛИАЗ 5292XX

Бурное развитие в мире гибридных транспортных средств и перспективы их развития не остались без внимания российских специалистов в этой области. Сразу несколько предприятий Концерна «Русэлпром» ведут разработки и подготовку производства электрических машин, силовой и управляющей электроники, испытательных стендов для приемо-сдаточных и квалификационных испытаний как составных частей, так и всего КТЭО электрических транспортных средств: большегрузных самосвалов, многосцепных автопоездов, многоосных колесных тягачей, сельскохозяйственных и промышленных колесных и гусеничных тракторов.

К этому перечню добавилось еще одно направление — гибридный автобус.

На Международном автотранспортном форуме, Москва, 9—12 сентября 2008 г. «Группа ГАЗ» представила городской автобус ЛИАЗ 5292XX с гибридной энергоустановкой (см. рис. 3). По итогам форума этот автобус был признан лучшим автобусом года в России. Автобус ЛИАЗ 5292XX — результат совместной работы концерна «Русэлпром» и Ликинского автобусного завода. Разработка КТЭО к автобусу велась ООО «Русэлпром-электропривод». Это первый российский автобус с гибридным приводом, аналогов которого нет ни у одного отечественного производителя. Основные ожидаемые преимущества гибридного привода городского автобуса:



Рис. 3. Автобус ЛИА3 5292XX (концепт) с гибридным приводом на Международном автотранспортном форуме (выставочный комплекс КРОКУС-ЭКСПО, Москва, 9—12 сентября 2008 г.)

- снижение в 10 раз уровня выбросов при езде в городском цикле (Евро-5);
 - работа в оптимальных по топливной эффективности режимах работы ДВС;
 - экономия топлива на 25—50%;
 - возможности пуска ДВС от накопителей без стартера;
 - возможность генерации и рекуперации электроэнергии;
 - снижение мощности ДВС на 25—30% при сохранении тягового момента на колесах;
 - повышение комфортабельности (шум, вибрация, управляемость);
 - повышение надежности и ресурса работы.
 - наиболее комфортный проезд (более плавные старт и торможение), т.к. отсутствует прерывание потока мощности от энергоустановки до ведущих колес.
- Основные технические данные гибридного автобуса ЛИА3 5292XX:
- масса — 18,2 т;
 - вместимость 100 чел.;
 - радиус качения ведущих колес — 466 мм;

- максимальная скорость — 90 км/ч;
 - максимальный преодолеваемый подъем — 20%.
- Основными задачами разработки являлись:
- формирование рационального состава семейства гибридных автобусов ЛИА3;
 - создание технического задела, необходимого для организации производства гибридных автобусов на предприятиях ОАО «ЛИАЗ» (при возможном участии европейских партнеров);
 - формирование необходимой производственной кооперации и проверка ее способности к освоению и систематическим поставкам КЭУ и их модификаций;
 - оценка основных экономических показателей КЭУ и затрат, необходимых для организации их производства;
 - создание и отработка в ходе опытной эксплуатации макетного объекта, обеспечивающего полный цикл эксплуатации в городских условиях;
 - практическая проверка и отработка базовых технических решений

путем разработки, изготовления, исследовательских, приемочных и эксплуатационных испытаний опытных образцов автобусов с КЭУ.

Для достижения требуемых характеристик при движении в городе (цикл НАМИ II) тяговое оборудование автобуса должно обеспечивать следующие показатели (оценки тягово-динамических расчетов): средняя мощность, требуемая для городского движения, составляет 33 кВт; максимальная (пиковая) мощность — около 250 кВт; при скоростном движении (90 км/ч) требуется тяговое усилие 5000 Н; мощность 115 кВт; при движении на подъеме 20% (12°) со скоростью 10 км/ч (масса 13 т, 30 с) тяга составляет 29000 Н, мощность 80 кВт.

Комплект тягового электрооборудования выполнен по последовательной схеме. Выбор последовательной схемы обусловлен мировым опытом, минимальной стоимостью и сроками разработки, внедрения и окупаемости проекта. Обоснование выбора всех компонентов тягового электрооборудования дано в [1]. Основные характеристики силового оборудования КТЭО автобуса ЛИА3 5292XX приведены в таблице 1.

Любопытно, что характеристики силового оборудования КТЭО автобусов ЛИА3 5292XX, Scania и MAN Lion's City, имеющих подобные технические данные по пассажироместности, массе и габаритам, практически совпали. Отметим в этой связи, что тягово-динамические расчеты, выбор кинематической схемы, определение основных характеристик силовых устройств КТЭО, проектирование и изготовление агрегатов автобуса ЛИА3 5292XX завершились в Концерне «Русэлпром» до того, как были опубликованы данные зарубежных аналогов, что, разумеется, свидетельствует об объективности полученных оценок.

СОБЫТИЯ РЫНКА

| ГРУППА КОМПАНИЙ ФОРМИРУЕТ АЛЬЯНС ПО МНОГОЯДЕРНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ | В сфере многоядерной параллельной обработки и разработки программного обеспечения организован новый альянс. Группа компаний, получившая название eNsemble Multi-Core Alliance, выполняет функцию базовой организации, которая помогает OEM-производителям разрабатывать высокопроизводительное сетевое оборудование с применением передовых многоядерных процессоров.

Одним из членов-учредителей группы является компания NetLogic Microsystems Inc. Другими членами альянса являются 6WIND, Abatron, Advantech, AirHop Communications, Aricent, Axentra, BitDefender, BroadWeb, Continuous Computing, CriticalBlue, D2 Technologies, Effnet, ENEA, JumpGen Systems, Kaspersky Lab, Lanner Group, Macraigor, Mentor Graphics, NEXCOM, Procera Networks, Qosmos, Sensory Networks, Silicom и TeamF1.

Альянс eNsemble Multi-Core Alliance объединил поставщиков лучших аппаратных платформ и программного обеспечения, которые предлагают широкий набор решений и которые являются лидерами в своей области деятельности.

Альянс обеспечивает базу, на которой разработчики могут создавать новые решения, которые будут в полной мере использовать высокую производительность и функциональные возможности многоядерных процессоров. Альянс получил решительную поддержку от компаний-лидеров отрасли и приглашает к участию в нем других поставщиков многоядерных процессоров.