

# Тенденции в развитии транспортных средств

## с использованием электрического привода

**Изобретение паровой машины Джеймсом Ваттом создало предпосылку для создания средств автономного передвижения. Недостаток технологии, выразившийся в значительном весе и размерах силовой установки, не позволял сделать транспортное средство действительно автономным. Успех железнодорожного транспорта, привязанного к специально построенным дорогам, не распространился на omnibusы. Компактный двигатель внутреннего сгорания (ДВС) позволил избавиться от привязки к специально построенному пути и разрешил проблему автономности. В то же время успехи в производстве и распределении электроэнергии, наряду с прогрессом в создании химических источников тока (ХИТ), в том числе аккумуляторного типа, предоставили альтернативу автомобилю — электромобиль.**

**В. А. Скворцов,  
к. т. н.**

sva@ie.tusur.ru

**Александр Берестов**

baa@ie.tusur.ru

Высокие тяговые характеристики электромотора (ЭМ), наряду с отсутствием шума и неприятного выхлопа, позволяли электромобилу успешно конкурировать с автомобилем. Автономные передвижные объекты (АПО) для передвижения по суше представлены двумя основными типами: авто- и электромобилями. Другие типы, такие, как электровозы, тепловозы, трамваи, троллейбусы, транспорт на магнитной подвеске имеют тем или иным способом ограниченную автономность. Они привязаны либо к специально построенному пути, либо к специально построенной системе энергоснабжения, либо к тому и другому одновременно.

Что же является первичным источником энергии для упомянутых выше систем? Для ДВС — это органическое топливо, хранимое в специальном резервуаре и пополняемое на сети заправочных станций. В электромобиле это сохраненная в ХИТ электроэнергия. Высокие удельные показатели топлива как энергоносителя, по сравнению с ХИТ, позволило автомобилям вытеснить электромобили в область, где недостатки ДВС ограничивали применение последнего.

Тем не менее специфические свойства электроэнергии привели к постепенному появлению на автомобиле автономной электросети для вспомогательных целей: систем освещения, систем зажигания, систем старта ДВС, систем вентиляции и так далее. Для пополнения запаса электроэнергии на автомобиле появился генератор, обслуживающий первичный источник электроэнергии — аккумуляторную батарею.

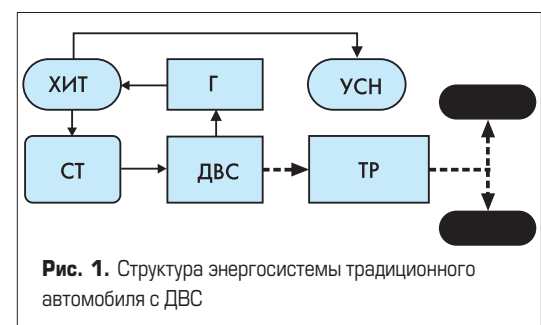
В настоящее время мы имеем две основные системы привода АПО, разделяемые по признаку используемого источника энергии. В традиционном

автомобиле механическая энергия, вырабатываемая ДВС, используется для перемещения и, при необходимости, преобразуется в электрическую для снабжения вспомогательных устройств собственных нужд (УСН). В традиционном электромобиле электроэнергия, запасенная ХИТ, посредством электромотора преобразуется в механическую, используемую для перемещения, и так же используется для УСН.

Рассмотрим различные типы автономных подвижных объектов с точки зрения устройств энергоснабжения и назначения последних. Сложившаяся структура АПО с ДВС приведена на рис. 1.

Здесь основным источником механической энергии является ДВС, используемый для движения, механически связанный с трансмиссией (ТР) (сцепление, коробка передач и прочее), необходимой для передачи механической энергии на движитель — обычно колеса. Для запуска и обслуживания ДВС, обеспечения условий перевозки пассажиров или груза существуют дополнительные устройства. Отметим основные:

**СТ** — стартер для пуска двигателя (сообщение начальной механической энергии);



**Рис. 1.** Структура энергосистемы традиционного автомобиля с ДВС

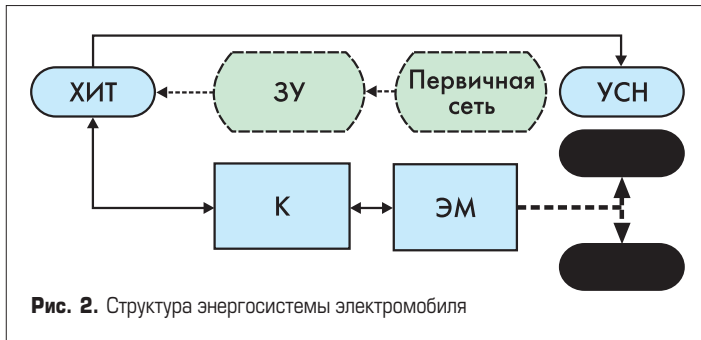


Рис. 2. Структура энергосистемы электромобиля

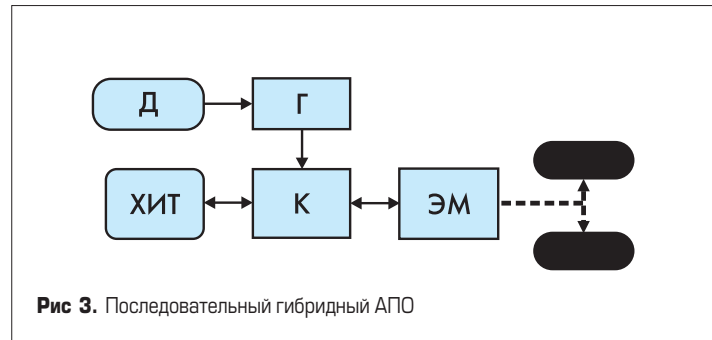


Рис. 3. Последовательный гибридный АПО

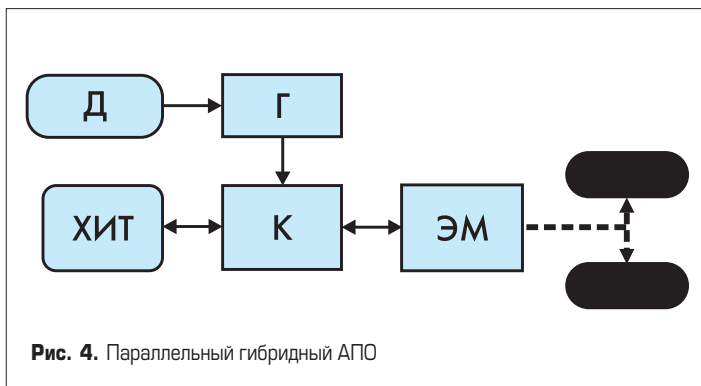


Рис. 4. Параллельный гибридный АПО

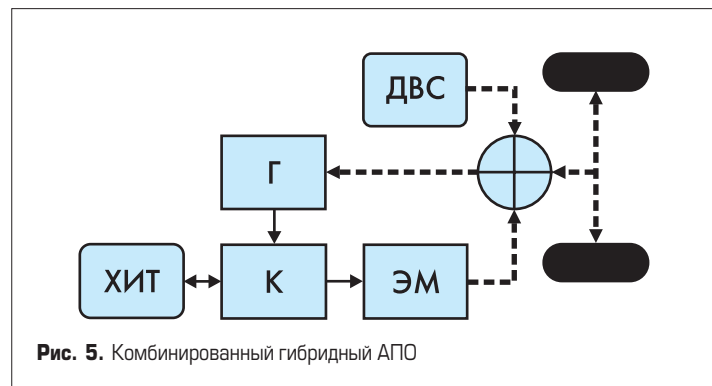


Рис. 5. Комбинированный гибридный АПО

ХИТ — буферный источник электроэнергии аккумуляторного типа;

Г — генератор, преобразовывающий часть энергии ДВС в электроэнергию;

УСН — устройства обеспечения собственных нужд (освещение, вентиляция, развлечения и так далее).

В отличие от автомобиля, структура электромобиля содержит меньше узлов, значимых с энергетической точки зрения (рис. 2).

Основной источник энергии — ХИТ, К — контроллер, управляющий потоком электроэнергии к ЭМ — электродвигателю, который преобразовывает электроэнергию в механическую, используемую для перемещения. Вне зависимости от типа применяемого в электромобиле ХИТ можно выделить энергетически важный компонент: ЗУ — зарядное устройство, сопрягающее первичную распределительную сеть и ХИТ. Зарядное устройство может быть установлено как на АПО, так и вне его, например, в зоне обслуживания. УСН выполняют те же функции, что и в АПО с ДВС.

Естественно существование промежуточного класса АПО, так называемых гибридных автомобилей, использующих, по определению, более одного метода получения механической энергии для передвижения [1], например ДВС и электродвигатель. Существует четкая классификация гибридных АПО [1, 2], показанная на рис. 3–5.

Различают два основных типа гибридных АПО: последовательные и параллельные, их структуры представлены на рис. 3 и рис. 4 соответственно. В последовательном гибридном АПО (рис. 3), двигатель приводит генератор, который снабжает электроэнергией мотор или заряжает батарею. Таким образом, механическая энергия ДВС не используется непосредственно для перемещения.

В параллельном гибридном АПО (рис. 4) как ДВС, так и электродвигатель вырабатывают механическую энергию непосредственно для перемещения.

Комбинированные гибридные АПО (рис. 5), соединяют преимущества параллельного и последовательного типов. При этом ДВС используется в оптимальном режиме. Недостаток комбинированного гибрида — повышенная стоимость, отдельный генератор и повышенная сложность управления потоком механической энергии.

Основным недостатком последовательного гибридного АПО является снижение КПД при двойном преобразовании потока энергии на пути от двигателя к движителю. Типичным представителем электромобиля является General Motors EV1, гибридных — Toyota Prius и Honda Insight.

В зависимости от доли электроэнергии, используемой для перемещения, гибридные АПО разделяют на силовые, умеренные, собственно гибридные и подзаряжаемые (табл. 1). При этом силовой гибрид ближе всего к автомобилю, а подзаряжаемый гибрид — к электромобилю. Соответственно изменяются и функциональные возможности АПО.

При рассмотрении задачи перемещения, решаемой АПО, приходится учитывать экологические аспекты. Следует отметить следующее:

1. АПО с ДВС имеет значительный запас хода благодаря высоким удельным показателям энергоносителя, при этом выбросы ДВС в атмосферу на единицу произведен-

ной энергии превосходят таковые для стационарных электростанций.

2. Электромобиль не дает выбросов в атмосферу (как минимум в месте его использования), однако недостаточная энергоемкость и высокая цена аккумуляторов сужает области применения электромобилей.
3. Область применения электромобилей — это закрытые помещения, зоны отдыха, места проведения спортивных состязаний.
4. Гибридные АПО совмещают достоинства автомобиля с ДВС и электромобиля, расширяя область применения последних и одновременно уменьшая абсолютный уровень выбросов.

Неправомерно классифицировать АПО по относительной мощности установленного электрооборудования. Тем не менее развитие преобразовательной техники и, соответственно, качественное и надежное управление потоком электроэнергии позволило внедрить электроприводы в те области, где ранее использовались механические передачи: вентилятор двигателя, насосы систем питания, смазки и охлаждения и так далее. Самое примечательное состоит в том, что значительное превышение мощности генератора над мощностью стартера вынудило автопроизводителей к совмещению функций в так называемом интегрированном стартер-генераторе (ИСГ). При установке на АПО с ДВС интег-

Таблица 1

Функциональные возможности	Энергетический тип АПО				
	Обычный АПО	Силовой гибрид	Умеренный гибрид	Полный гибрид	Заряжаемый гибрид
Полная остановка двигателя при остановке АПО	Х	Х	Х	Х	Х
Регенеративное торможение бортовой сети более 60 В		Х	Х	Х	Х
Двигатель меньшего объема при сохранении эксплуатационных качеств			Х	Х	Х
Способность передвижения на электрическом ходу				Х	Х
Заряд ХИТ от бытовой сети					Х
Запас хода от ХИТ не менее 20 миль					

Таблица 2

Тип УСН	Установленная мощность	Потребительские свойства	Примечание
Интегрированный стартер-генератор	6–10 кВт	Бесшумный старт, снижение выхлопа; Увеличенный крутящий момент на низких оборотах; Повышенная мощность электросистемы	Новые возможности для производителей оборудования
Преобразователи постоянного тока	500 Вт – несколько кВт	Быстрое внедрение 42 В устройств в существующие 12 В	Необходимо при переходе от 12 В к 42 В
Компрессор климатической установки	Несколько кВт	Улучшение использования энергии; Снижение шума; Повышение надежности	Замена ременной передачи
Электроусилитель рулевого управления	1 кВт – несколько кВт	Удобство, улучшение использования энергии	Невозможно для автомобилей класса D и выше
Вентилятор двигателя	100 Вт	Улучшение использования энергии; Снижение шума; Повышение надежности	Замена ременной передачи
Электромеханический привод клапанов	Несколько кВт	Улучшение использования энергии	Повышение КПД мотора

рированного стартер-генератора оказалось возможным использовать его для расширения диапазонов регулирования скорости и момента привода в переходных режимах. Таким образом, при наличии ИСГ АПО с ДВС автоматически становится гибридным. Логично было бы предположить, что подобная ситуация стала бы предпосылкой для дальнейшего внедрения гибридного привода. Однако этого не происходит. Что же препятствует внедрению электрического привода в автомобили? Вероятнее всего, это традиции. Электрооборудование автомобиля воспринимается как нечто дополнительное к собственно автомобилю. Электрификация многих узлов производится только на автомобилях класса люкс. Она заключается в замене механических приводов традиционных автомобилей с ДВС на электрические приводы в таких узлах, как рулевое управление, тормозная система и т. д. Причем замена проводится без изменения самой функциональной структуры узлов: просто электроприводы удобнее механических, хотя исполняют те же роли, что до того исполняли гидронасос, компрессор или механическая передача. Оснащение АПО вышеуказанным оборудованием приводит к значительному увеличению мощности системы генерации электроэнергии, что опять же приводит к необходимости использования ИСГ.

Основным фактором совершенствования ДВС становится экологический. Другими словами, выхлоп уменьшается за счет увеличения КПД и совершенствования процесса переработки продуктов сгорания. При этом, по заявлению компании General Motors [5], комплекс мер для удовлетворения требований экологии достигает \$3000 на автомобиль. Последняя цифра сопоставима как со стоимостью собственно 6-цилиндрового ДВС объемом 3 литра, так и со стоимостью «гибридизации» [2]. Однако системы с ИСГ находятся в стадии внедрения без увеличения доли электроэнергии, а идентичные по структуре гибридные АПО выпускаются серийно уже 6 лет.

В зависимости от класса автомобиля, установленная мощность УСН составляет несколько десятков киловатт [4], что, по сути, является движением в сторону гибридизации. УСН позволяют совершенствовать как параметры ДВС, так и потребительские свой-

ства автомобиля. Типовые УСН и их характеристики приведены в таблице 2 [4].

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод — практически все автомобили с установленным ИСГ являются параллельными гибридными АПО с ограниченной установленной мощностью ХИТ.

С другой стороны, технологии ХИТ аккумуляторного типа не стоят на месте. Новые типы — Ni-H с хранением водорода в гидридах, Li-Poly и Li-Ion при сравнительно нетоксичных составляющих позволили увеличить удельную энергоемкость в десятки раз по сравнению с наиболее массовым кислотно-свинцовым аккумулятором. На данном этапе наиболее оправданной по удельным стоимостным показателям является электрохимическая система Ni-H. При существующем технологическом заделе емкость литиевых систем не возрастет в ближайшем будущем более чем на 10–15% (по оценкам Intel). Более того, прогресс в технологии свинцового аккумулятора позволил серийно выпускать электромобиль с коммерчески достаточными пробегом и временем перезарядки.

Во всех структурах АПО можно выделить одну общую часть электрической подсистемы (рис. 6).

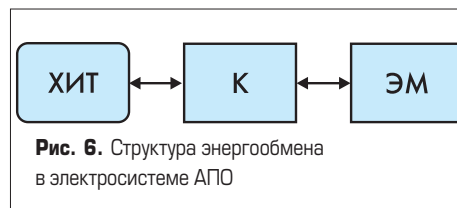


Рис. 6. Структура энергообмена в электросистеме АПО

Применительно к АПО наименее проработанными элементами являются преобразователь и мотор. Потребительские свойства АПО определяются совокупными свойствами всех трех узлов электросистемы. Невозможно получить необходимые параметры движения АПО, основываясь только на характеристиках электромотора.

Рассмотрим основные типы ЭМ, используемых в приводе АПО. Это электромоторы постоянного тока, трехфазные асинхронные и синхронные. ЭМ обычно подразделяют по схеме включения обмотки возбуждения относительно обмотки якоря — последовательного, параллельного и, при питании обмотки возбуждения от независимого источника — независимого возбуждения.

Преимущество ЭМ постоянного тока последовательного возбуждения состоит в способности создавать высокий крутящий момент при пуске, что обуславливает их широкое распространение в приводе малых АПО — электрокаров и машин для гольфа. К недостаткам следует отнести нелинейность зависимости между моментом и скоростью, сложность при реверсе, динамическом и генераторном торможении. ЭМ параллельного возбуждения имеет жесткую нагрузочную характеристику, но из-за низкого пускового момента не применяется для привода в АПО. ЭМ независимого возбуждения позволяет варьировать характеристики в пусковом и рабочем режимах, осуществлять динамическое и генераторное торможение путем управления небольшим, относительно тока якоря, током обмотки возбуждения. Сходными параметрами обладают и трехфазные синхронные ЭМ. АПО с трехфазными асинхронными ЭМ либо находятся в стадии прототипов, либо уже сняты с производства, как EV1 от General Motors. В серийно выпускающихся гибридных АПО, например, Тойота Prius, используется именно синхронный ЭМ переменного тока [6]. Для электромобилей меньшего класса и пробега, где стоимость является одним из определяющих факторов, используются ЭМ постоянного тока с независимым возбуждением.

Гибкость в управлении ЭМ с независимым возбуждением достигается за счет использования преобразователя или контроллера. При этом, в зависимости от области применения, характеристики привода могут быть настроены путем изменения алгоритма управления. Появляется возможность не только настроить алгоритм управления преобразователя с точки зрения потребительских свойств [7], но и учесть ограниченность запаса электроэнергии и особенность применяемого ХИТ, то есть достичь максимально возможного пробега при заданном заряде аккумуляторной батареи, равно как и увеличить срок службы последней.

## Литература

1. A New Road: The Technology and Potential of Hybrid Vehicles by David Friedman. Union of Concerned Scientists. January 2003.
2. Comparing the Benefits and Impacts of Hybrid Vehicles Options. EPRI. Palo Alto.
3. Severinsky A., Louckes T., Templin R., Adamson N., Polletta D. Hyperdrive as Powertrain Successor. Warrendale, Penn.: Society of Automotive Engineers. 2002-01-1909. June, 2002.
4. Kozlowski F., Krumrey J., Karl A. Power Semiconductors and Modules for 42V Applications. Infineon Technologies, Eupec. 2000.
5. Голованов М. Экстенсивная Америка // Авторевю. № 2 (304). 2004.
6. U.S. Pat. 5374881 Electric Motor Controller. Curtis Instruments, Inc. H02P 3/10. Dec. 20, 1994.
7. U.S. Pat. 5565760 Electrical Propulsion System For A Golf Car. General Electric Company. H02P 5/16. Oct. 15, 1996.