

В. А. Щетина Ю. Я. Морговский
Б. И. Центер В. А. Богомазов

ЭЛЕКТРОМОБИЛЬ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

1987

ЭЛЕКТРОТОВАРИ

ТЕХНИКА
И ЭКОНОМИКА

Под общей редакцией
д-ра техн. наук проф. **В. А. Щетини**



Ленинград
«Машиностройение»
Ленинградское отделение
1987

ББК 39.33
Э45
УДК 629.113.6

В. А. Щетина, Ю. Я. Морговский, Б. И. Центер, В. А. Богомазов

Рецензент д-р техн. наук, проф. **В. В. Бурков**

Э45 **Электромобиль: Техника и экономика/В. А. Щетина, Ю. Я. Морговский, Б. И. Центер, В. А. Богомазов; Под общ. ред. В. А. Щетины — Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1987. — 253 с.: ил.**

(В пер.). 1 р. 20 к.

В книге рассмотрены вопросы совершенствования электромобилей и области их эффективного использования. Приведены данные отечественных и зарубежных исследований по использованию химических источников тока, проанализированы различные тяговые системы электромобилей, дана оценка влияния на эффективность электромобилей конструктивных параметров и социально-экологических факторов.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, занимающихся конструированием и эксплуатацией электромобилей.

Э $\frac{3603030000-313}{038(01)-87}$ 313-87

ББК 39.33
6Т2.1

Все возрастающая потребность народного хозяйства страны в перевозках грузов и пассажиров вызывает необходимость увеличения и интенсификации использования парка автомобильного транспорта. Это приводит к повышению уровня загрязнения воздушной среды отработавшими газами двигателей внутреннего сгорания, а также к росту уровня шума транспортных потоков на улицах и магистралях, особенно крупных городов. В связи с этим в «Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года» намечено «усилить охрану атмосферного воздуха ... в этих целях совершенствовать технологические процессы, оборудование и транспортные средства; улучшать качество сырья и топлива; внедрять высокоэффективные установки для очистки промышленных и других выбросов» [2]. Кроме того, в XII пятилетке предусматривается обеспечить экономию бензина и дизельного топлива в размере 18—20 % по сравнению с 1985 г.

Одним из возможных направлений в решении поставленных задач является использование в качестве транспортных средств электромобилей.

В развитии производства электромобилей имеется еще ряд нерешенных вопросов как технического, так и экономического плана. В предлагаемой читателям книге описаны основные этапы и особенности развития электромобилей, а также перспективы их использования в народном хозяйстве.

Приведенные в книге основные технико-эксплуатационные показатели электромобилей, созданных в различные периоды их развития, свидетельствуют о том, что они имеют тенденцию к постоянному улучшению.

В книге показано, что повышение технико-эксплуатационных показателей электромобилей в значительной степени зависит

от их конструктивных особенностей и используемых химических источников тока.

В связи с этим в книге важное место отведено исследованию тяговых систем электромобилей, их оптимизации, анализу возможностей применения различных типов источников тока.

Наряду с этим рассматриваются вопросы влияния конструктивных параметров на эффективность электромобилей. Изложена подробная оценка влияния параметров массы электромобилей на их производительность, приведенные затраты и себестоимость перевозок.

В книге дана методика и приведены примеры расчета области эффективного использования электромобилей.

При оценке эффективности использования электромобилей предлагается учитывать социально-экологические факторы, т. е. ущерб, наносимый отработавшими газами автомобильного транспорта.

Авторы надеются, что книга окажет определенную помощь инженерно-техническим и научным работникам при проведении исследований и оценке эффективности применения на транспортных средствах различных тяговых систем и источников тока.

Книгу написали д-р техн. наук В. А. Щетина (предисловие, введение, гл. 1 — п. 1.1 и 1.3, гл. 5), канд. техн. наук Ю. Я. Морговский (гл. 3 и п. 1.2), д-р техн. наук Б. И. Центер (гл. 2), канд. экон. наук В. А. Богомазов (гл. 4, 6).

Одним из главных направлений экономической стратегии партии на современном этапе создания материально-технической базы коммунизма является повышение эффективности общественного производства. Основные пути его осуществления раскрыты в решениях XXVI и XXVII съездов и последующих пленумов ЦК КПСС.

При развитии общественного производства в условиях научно-технического прогресса ставится задача перехода к принципиально новым конструктивным схемам и технологиям. Как было отмечено на апрельском 1985 г. Пленуме ЦК КПСС М. С. Горбачевым: «В большинстве отраслей научно-технический прогресс протекает вяло, по сути дела эволюционно — преимущественно путем совершенствования действующих технологий, частичной модернизации машин и оборудования. Конечно, эти меры дают определенную отдачу, но она слишком мала. Нужны революционные сдвиги — переход к принципиально новым технологическим системам, к технике последних поколений, дающим наивысшую эффективность» [1].

Это относится ко всем отраслям народного хозяйства, в том числе и к автомобильному транспорту, роль которого в экономике страны с каждым годом возрастает.

Дальнейшее развитие и эффективное функционирование транспортной системы являются важными условиями социального и экономического прогресса нашего государства при интенсификации народного хозяйства, сопровождаемой увеличением объемов перевозок грузов и пассажиров.

Все возрастающая роль в обеспечении народнохозяйственных перевозок принадлежит автомобильному транспорту, на котором осуществляется до 80 % объема перевозок грузов и до 70 % — пассажиров.

Вышеизложенное предопределяет необходимость совершенствования структуры парка подвижного состава автомобильного

транспорта в целях снижения себестоимости перевозок, сбережения энергоресурсов и сохранения воздушной среды. Это особенно важно учитывать при осуществлении перевозок в крупных городах.

В постановлениях ЦК КПСС и Совета Министров СССР уделено большое внимание вопросам дальнейшего усиления воздействия хозяйственного механизма на повышение эффективности работы предприятий и организаций транспорта, а также обеспечения сохранности и экономии горючесмазочных материалов. Последнее неразрывно связано с проблемой рационального и бережного расходования энергетических ресурсов, и прежде всего невозможных, к числу которых относится жидкое топливо. В настоящее время автомобильный транспорт страны является основным потребителем нефтяных топлив. Учитывая ограниченность последних, а также необходимость уже в XI и XII пятилетках осуществления экономии жидких топлив в размере, превышающем 12 млн. т, важно бережное отношение к их расходованию. Это положение (применительно к экономии топлива на автомобильном транспорте) может быть реализовано по многим направлениям, из которых следует выделить:

дальнейшее совершенствование перевозочного процесса и управления им, начиная с улучшения организации перевозок и заканчивая разработкой новой нормативной базы по расходу топлива и усилению контроля за ним;

повышение темпов дизелизации автомобильного парка, совершенствование его структуры и освоение новых более экономичных моделей бензиновых двигателей;

изыскание и широкое применение на автомобильном транспорте новых малотоксичных видов горючего и прежде всего сжатого газа, метанола и др.;

разработку и применение в качестве транспортных средств электромобилей на базе высокоэнергоемких химических источников тока.

Реализация перечисленных направлений (в особенности последних двух) будет способствовать, при прочих равных условиях, дальнейшему совершенствованию перевозочного процесса, а также решению экологической проблемы. Этой важной проблеме наша партия и правительство уделяли и уделяют исключительно большое внимание. В 1978 г. вышло постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР «О дополнительных мерах по усилению охраны природы и улучшению использования природных ресурсов», а в 1980 г. принят «Закон СССР по охране атмосферного воздуха».

В декабре 1970 г. в СССР был утвержден первый стандарт на ограничение выбросов окиси углерода автомобилями с карбюраторными двигателями на режиме холостого хода, а с 1975 г. введен ОСТ 37-001-054—74 на выделение токсичных веществ автомобилями при испытании их по Европейскому ездовому циклу (Правила № 15).

Решение вопроса дальнейшего снижения выброса токсичных веществ с отработавшими газами (особенно у бензиновых двигателей) вызывает необходимость дальнейшего усложнения конструкции и технологии изготовления двигателей, что приводит к значительному возрастанию затрат на их производство и эксплуатацию.

В связи с этим при решении проблемы охраны окружающей среды от вредного воздействия автомобильного транспорта требуется комплексный подход, реализация которого обеспечит выполнение поставленной задачи при минимуме затрат на перевозку в масштабе народного хозяйства. В этом отношении заслуживают особого внимания вопросы дальнейшего совершенствования структуры парка автомобильного транспорта на перспективу. При обосновании этой структуры, прежде всего грузового парка, важно установить не только его рациональный состав по грузоподъемности (малой, средней, большой), но и обеспечить его совершенствование за счет применения малотоксичных транспортных средств, работающих на сжатом газе и других видах топлива, а также электромобилей, практически не загрязняющих воздушную среду.

При этом важно заметить, что с позиции применяемого источника энергии электромобиль имеет хорошие перспективы по сравнению с существующими автомобилями, так как он является потребителем электроэнергии. Последняя может быть получена, главным образом, за счет ввода новых мощных ядерных электростанций; использования существующих тепловых электростанций, работающих на сланцах и других недорогих топливах. Кроме того, в перспективе могут быть использованы солнечная и другие виды энергии, запасы которых практически неисчерпаемы. Несомненно, что наиболее перспективными источниками из всех форм нетрадиционных энергетических ресурсов является ядерная и солнечная энергия.

Потенциальные запасы мировых энергоресурсов распределяются следующим образом: ядерное топливо до 90 %, все виды твердого топлива примерно 9 %, нефть и газ вместе около 1 %.

Из вышеизложенного следует, что энергия атома является основным и реальным источником, способным в ближайшие десятилетия компенсировать прогрессирующее истощение ископаемых топлив.

Следует также заметить, что использование электромобилей в народном хозяйстве не должно приводить к увеличению «пиковых» нагрузок при потреблении электроэнергии, так как подзарядка аккумуляторных батарей будет проводиться, главным образом, в ночное время. Это позволит осуществить выравнивание потребления электроэнергии в течение суток.

Сказанное выше предопределяет перспективы использования этой энергии для электромобилей, что в принципе должно способствовать развитию их производства и снижению себестоимости

перевозок, которая пока еще выше, чем у аналогичных по грузоподъемности автомобилей.

При этом следует учитывать, что автомобильный транспорт остается основным загрязнителем воздушной среды, особенно в условиях крупного города, так как на его долю приходится в среднем до 60 % окислов углерода, 50 % углеводородов и около 40 % окислов азота.

В целях поддержания воздушной среды в соответствии с требованиями санитарных норм были введены, разработанные НИИ-АТом, государственные стандарты на содержание окислов углерода в отработавших газах автомобилей с карбюраторными двигателями (ГОСТ 17.2.2.03—77) и дымность дизельных автомобилей (ГОСТ 21393—75).

Однако, учитывая дальнейший рост автомобильного парка (особенно крупных городов), в целях поддержания санитарных норм воздушного бассейна потребуется вводить все более жесткие требования на ограничение выбросов токсичных веществ существующих автомобилей.

В связи с этим в книге поставлена основная задача — рассмотреть комплекс инженерных и экономических подходов, позволяющих определить перспективы развития в области эффективного использования электромобилей в народном хозяйстве страны. Одной из важных особенностей книги является то, что в ней, наряду с обоснованием выбора рациональных тяговых систем электромобилей и рекомендаций по выбору и использованию для них источников энергии, рассматриваются взаимоувязанные инженерно-экономические и социальные аспекты применения электромобилей в транспортной системе страны. При этом авторы не противопоставляют электромобили существующим автомобилям, которые в настоящее время способны эффективно обеспечить решение задач процесса перевозок. В данном случае важно рассмотреть возможности и целесообразность улучшения структуры автомобильного парка за счет пополнения его электромобилями, что может способствовать снижению загрязнения воздушной среды и уровня шумового воздействия транспортных потоков на человека в условиях города.

При положительном решении вопросов развития электромобилестроения появятся возможности использования электромобилей не только для перевозки грузов, но и пассажиров.

Реализация указанных направлений будет способствовать решению экологической проблемы в нашей стране.

Глава 1. ПРЕДПОСЫЛКИ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

В настоящее время нет единообразного и полного определения понятия электрический автомобиль. Иногда электромобили выделяют при классификации автомобилей по роду привода, понимая при этом «безрельсовые транспортные средства с автономным электроприводом» [33], а иногда по роду потребляемого топлива [22]. Следует отметить, что приведенные классификации не являются достаточными. В первом случае к электромобилям можно отнести карьерные автомобили с ДВС и электроприводом, выпускаемые Белорусским автомобильным заводом, а во втором — их можно отнести к автомобилям с ДВС. Это возможно в случае установки на электромобилях топливных элементов, работающих на нефтепродуктах. При этом необязательно, чтобы привод электромобиля был только электрическим. Возможно сочетание электропривода с механической трансмиссией, а также другие комбинации.

Более полным можно считать определение, данное О. А. Ставровым [39]: «Под термином электромобиль имеется в виду автомобиль, у которого для привода ведущих колес используется электрическая энергия, получаемая от химического источника тока».

Уточняя понятие электромобиль, следует в определении отразить те качества, которые наиболее полно характеризуют его отличия от других транспортных средств. Таковыми являются:

автономность энергоустановки и самого электромобиля;
использование в качестве первоисточника энергии химического источника тока.

Учитывая сказанное, можно дать следующее определение: электромобиль — это безрельсовое транспортное средство с автономным химическим источником энергии (тока).

1.1. ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ И ИХ КОНСТРУКЦИИ

Анализ работ по созданию электромобилей за рубежом и в нашей стране, начиная с момента их зарождения и включая сегодняшний день, показывает, что можно условно выделить пять периодов их развития:

- первый — зарождения (1837—1895 гг.);
- второй — интенсивного развития и конкуренции (1896 — 1930 гг.);
- третий — локального использования (1931—1960 гг.);
- четвертый — широкого проведения опытно-конструкторских работ и выпуска большого числа опытных образцов и малых серий опытных электромобилей (1961—1982 гг.);

пятый — определенный спад работ, вызванный резким изменением конъюнктуры на нефтяном рынке и неудачами в эксплуатации опытных партий из-за недостатков источников тока (после 1982 г.).

К предвестникам электромобилей, характеризующим первый этап их развития, можно отнести экипажи, созданные в 1837 г. американцами Девенпатором и Пейджем, а также шотландцем Робертом Девидсоном.

В 1838 г. в России опыты с двигателем, питаемым от батарей гальванических элементов, проводил Б. С. Якоби.

Начиная с 1880 г., развитие электромобилей происходило параллельно с автомобилем. В эти годы автомобили с ДВС еще не являлись серьезным конкурентом электромобилям. Это было обусловлено тем, что конструкция электромобилей была проще и они (как и автомобили) использовались только в городах и осуществляли передвижение в радиусе 10—15 км. Скорость таких экипажей не превышала 20 км/ч.

Второй этап характеризуется значительной конкуренцией в области создания автомобилей, производство которых стало заметно возрастать. В этот период электромобили начинают выпускаться серийно. Так, в 1897 г. на улицах Лондона появились и успешно работали электромобили-такси, внешне мало отличавшиеся от традиционных английских кебов. В 1906 г. А. Вердэном во Франции было организовано серийное производство легковых электромобилей, имевших запас хода до 80 км и максимальную скорость движения до 30 км/ч.

В 1899 г. появились первые русские электромобили, созданные инженером И. В. Романовым, а в 1901 г. им был построен первый 15-местный электробус (рис. 1.1).

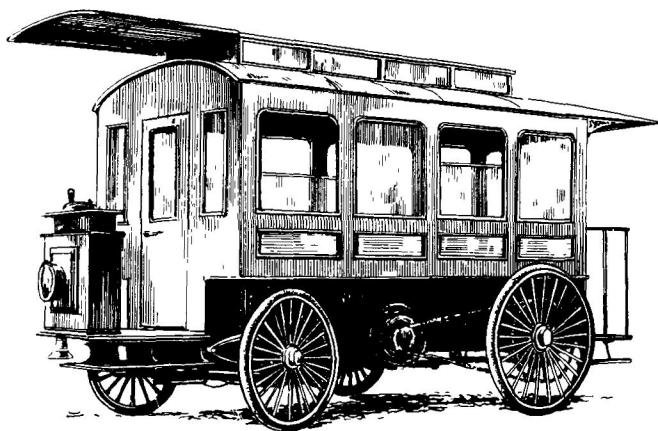


Рис. 1.1. Электрический омнибус И. В. Романова

Технические характеристики электромобилей
(за период 1916—1930 гг.)

Электромобили	Год выпуска	Полезная нагрузка, кг	Полная масса с грузом, кг	Батарея		Запас хода, км	Максимальная скорость, км/ч
				Энергоемкость, кВт·ч	Масса, кг		
Легковой	1923	244	2 234	18,1	780	85	39
	1926	210	1 110	9,6	—	100	35
Электробус	1916	1650	5 500	24,0	860	70	27
	1924	2500	12 000	60,5	3100	62	26
Фургон Грузовой	1923	579	2 700	16,2	800	67	30
	1923	5372	12 061	45,0	1600	55	22
	1923	2000	4 750	20,7	1100	—	—
	1924	1570	4 554	26,9	1000	68	26,5
	1924	6468	13 835	52,5	2150	47	18
	1926	1030	3 645	17,2	900	75	20,7
	1926	4070	9 100	28,4	1500	58,7	17
	1929	3500	8 760	28,4	1560	60	26

К концу прошлого столетия на электромобилях был установлен ряд рекордов по скорости движения. Так, в 1898 г. электромобиль достиг скорости 63,3 км/ч. Спустя год на соревнованиях, организованных Парижским автоклубом, он имел скорость 106 км/ч.

К началу XX века из всего числа автомобилей США 38 % имели электрические двигатели, 40 % — паровые, 22 % — бензиновые.

Для первого десятилетия этого периода характерен подъем в разработке и производстве электромобилей, а затем некоторый спад. В этот период серийное производство электромобилей было организовано в Англии, Германии, США, Франции, Японии и других странах. Так, в 1912 г. в США было выпущено 6000 легковых и 4000 грузовых электромобилей.

В качестве примера (табл. 1.1) приведены некоторые технико-эксплуатационные характеристики электромобилей рассматриваемого периода.

Из таблицы следует, что электромобили имели в среднем запас хода 50—80 км, а скорость 20—35 км/ч. При этом следует заметить, что грузовые электромобили имели относительно большую грузоподъемность, которая иногда превышала 6 т, а энергозатраты на перемещение были достаточно малы — 0,054—0,095 кВт·ч на 1 т·км полной транспортной работы электромобилей.

В 1918—1928 гг. упрощенные конструкции электромобилей в виде электротележек нашли широкое применение в качестве технологического транспорта на машиностроительных предприятиях.

Уже в первые десятилетия XX века повысилась конкурентоспособность автомобиля по отношению к электромобилю. Это объясняется дальнейшим совершенствованием конструкции поршневых двигателей, что обеспечило автомобилям скорости движения, превышающие 80 км/ч, а запас хода по топливу до 300 км. Это позволило использовать автомобиль за пределами города.

Организация массового производства автомобилей с ДВС и небольшая стоимость топлива при высоких технико-эксплуатационных показателях сделали автомобиль недостижимым для электромобиля.

Третий период характерен тем, что уже в начале 30-х годов XX века производство электромобилей резко сократилось. Лишь в отдельных странах, таких как Великобритания, Германия и США, продолжался их выпуск небольшими партиями. Электромобили использовались на перевозках, где требовались небольшие пробеги и невысокие скорости движения. В 1939 г. количество электромобилей в Германии составляло более 9 тыс., а к 1944 г. достигло 20 тыс. единиц. Последнее объясняется намерением правительства Германии уменьшить зависимость от импортного нефтяного топлива.

В третьем периоде также наблюдается рост производства электромобилей в Англии. Так, с 1930 по 1960 гг. их количество возросло в 15 раз и достигло 26 тыс. единиц. При этом электромобили эффективно использовались в процессе централизованной доставки на дом различных товаров из торговой сети, перевозки посылок и почты, т. е. там, где не требовались большие среднесуточные запасы хода и высокие скорости движения транспортных средств. В эти же годы в нашей стране периодически проводились работы по созданию экспериментальных образцов электромобилей. Так, в 1935 г. на базе автомобиля ГАЗ-А был построен первый советский электромобиль. В это же время в лаборатории электрической тяги Московского энергетического института под руководством проф. В. Е. Резенфорда и инж. Ю. М. Галкина был создан двухтонный электромобиль на базе автомобиля ЗИС-5. В 1948 г. в НАМИ были разработаны и изготовлены электромобили грузоподъемностью 0,5 и 1,5 т, четыре образца которых использовались для перевозки почты в Москве. Затем 10 опытных образцов этих электромобилей, изготовленных Львовским автобусным заводом, эксплуатировались в период с 1952 до 1958 гг. в Ленинграде; они также в основном использовались для перевозки почтовых грузов. Некоторые данные о технико-эксплуатационных параметрах этих электромобилей приведены в табл. 1.2.

В 1957 г. в НАМИ были разработаны новые образцы электромобилей той же грузоподъемности, а спустя два года НАМИ совместно с Ульяновским автозаводом имени В. И. Ленина был изготовлен опытный образец электромобиля грузоподъемностью 0,8 т на базе автомобиля УАЗ-450. В этот же период был создан

Технико-эксплуатационные характеристики электромобилей НАМИ

Параметр	НАМИ-750	НАМИ-751
Грузоподъемность, кг	500	1500
Масса в снаряженном состоянии, кг	1765	2640
Масса тяговой аккумуляторной батареи, кг	685	1100
Запас хода, км	55	70
Максимальный среднеэксплуатационный запас хода, км	45—50	55—60
Максимальная скорость движения, км/ч	33	30

первый советский электробус на базе троллейбуса СВАРЗ вместимостью 70—80 чел.

Из сказанного выше следует, что в период с 1930 по 1960 гг. в нашей стране регулярно проводились экспериментальные исследования по разработке и использованию электромобилей в народном хозяйстве страны, хотя широкого применения они не получили.

Четвертый период, начиная с середины 60-х годов XX века, характеризуется новым повышенным интересом к электромобилям во многих промышленно развитых странах. Особенно интенсивно начали они разрабатываться в США, Японии, ФРГ и Англии, что обусловлено главным образом обострением энергетической и экологической проблем. Возникший в конце 60-х и начале 70-х годов XX века энергетический кризис во многих капиталистических странах свидетельствовал о том, что ресурсы нефтяных топлив для автомобилей с ДВС на нашей планете ограничены. С другой стороны, большая насыщенность городов автомобильным транспортом вызвала резкое повышение уровня загрязнения воздушной среды отработавшими газами ДВС. Учитывая, что электромобилям не требуется жидкое топливо и они практически не создают шумового загрязнения и токсичных выбросов на магистралях и улицах городов, ученые и инженеры предприняли попытку с их помощью способствовать решению экологической проблемы. В связи с этим в период с 1966 по 1971 гг. было разработано наибольшее количество опытных образцов электромобилей, хотя дальнейшего заметного развития и применения они, как правило, не находили. Нередко за границей такие разработки носили рекламный характер. Основной причиной застоя в развитии современных конструкций электромобилей явилось отсутствие новых источников тока, обладающих высокой энергоемкостью при небольшой их стоимости.

Несмотря на указанные недостатки аккумуляторных батарей, производство электромобилей (например, в Англии) продолжает расти; в настоящее время их парк достиг 30 тыс. ед.

Следует заметить, что в рассматриваемый период наблюдалось развитие поисковых научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ и в нашей стране. В эту работу подключились НИИАТ, НАМИ, Всесоюзный НИИЭлектромеханики (г. Москва), Всесоюзный НИИЭлектротранспорта (г. Калининград), Ереванский политехнический институт, ХАДИ и др. Опытные образцы электромобилей создаются на Ульяновском имени В. И. Ленина, Волжском и Ереванском автозаводах, а также на заводе микроавтобусов имени XXV съезда КПСС (г. Елгава).

Первые партии опытных образцов электромобилей поступили для опытной эксплуатации в Москву и Подольск в 1975 г. С этого времени численность электромобилей в управлении Главмосавтотранса постепенно увеличивается.

В автокомбинате № 34 Главмосавтотранса периодически проходят опытную эксплуатацию 25 электромобилей типа РАФ, УАЗ и ЕрАЗ. При этом, например, электромобиль РАФ-22038 имеет следующие технико-эксплуатационные характеристики; при вместимости 7 чел., запасе хода 70 км и максимальной скорости движения до 70 км/ч его масса составляет 3000 кг. На этом электромобиле установлены трехфазный асинхронный двигатель и свинцово-кислотные аккумуляторы. Для эксплуатируемых грузовых электромобилей применяется ускоренная подзарядка аккумулятора; посты подзарядки размещены у грузополучателей. В течение часа (пока идут погрузочно-разгрузочные операции) осуществляется подзарядка аккумуляторов.

Однако опыт эксплуатации электромобилей выявил значительные их недостатки, и прежде всего традиционных свинцово-кислотных аккумуляторных батарей. Жесткий режим использования этих источников на электромобилях вызвал очень высокий уровень отказов аккумуляторов, а также резкое сокращение ресурса батарей. Высокий процент выхода из строя аккумуляторов как в результате отказов, так и в результате сокращения срока службы (падения отдаваемой емкости ниже уровня 0,8 от номинальной) определил существенный экономический ущерб от эксплуатации электромобилей. По ряду данных, эксплуатация электромобилей в период с 1980 по 1984 гг. характеризуется как убыточная. Некомпенсированная убыточность эксплуатации электромобилей вызвала тенденцию к сокращению их использования.

На выполнении зарубежных программ создания электромобилей отрицательно сказалось резкое снижение стоимости нефтяных топлив на мировом рынке в начале 80-х годов XX века. В результате этого была фактически приостановлена национальная программа работ по созданию электромобилей в США, а в других странах сократилось производство образцов и партий электромобилей.

Таким образом, можно выделить период спада производства и эксплуатации электромобилей. Прежде чем остановиться на более

подробном анализе состояния и перспектив проблемы в целом, рассмотрим некоторые вопросы конструкции электромобиля как транспортного средства.

1.2. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Современный уровень развития источников тока определяет практически все основные проблемы, возникающие при создании электромобилей. При этом мировой уровень и опыт разработки опытных образцов, а также результаты эксплуатации выпущенных электромобилей позволяют определить целесообразный типаж электромобилей на ближайший период (табл. 1.3).

Типы электромобилей приведены в табл. 1.3 в порядке их значимости для сферы потребления.

Следует заметить, что тип 4 для нашей страны представляет транспортное средство служебного назначения и при определенных экономических показателях он мог бы достаточно широко использоваться для целей медицинского и бытового обслуживания, а также деловых поездок внутри города или крупного предприятия. В некоторых странах этот тип рассматривается как второй автомобиль в семье, предназначенный для хозяйственных поездок.

Отметим прежде всего, что ряд вопросов создания электромобилей не является специфическим и имеет общий характер для всех типов современных автомобилей. К числу общих проблем относятся:

максимальное снижение массы экипажа, в том числе за счет использования новых материалов (алюминиево-магниевых сплавов, пластмасс и др.);

максимальное снижение коэффициентов сопротивления движению за счет улучшения аэродинамической формы, применения новых типов шин и т. д.

Эти общие проблемы определяются требованиями снижения материалоемкости и трудоемкости, а главное — повышением топливной экономичности современных транспортных средств. Поэтому, не задерживаясь на общих вопросах, относящихся к авто-

Таблица 1.3

Рациональный типаж электромобилей по полезной и общей массе

Тип	Эксплуатационное назначение	Полезная нагрузка, т	Полная масса, т
1	Грузовой электромобиль малой грузоподъемности	0,8—1,0	2,5—3,0
2	Грузовой фургон особо малой грузоподъемности	0,3—0,5	1,5—2,0
3	Городское такси	4—10 чел.	2,0—3,5
4	Внутригородской легковой электромобиль	2—4 чел.	1,2—2,0

мобильному транспорту в целом, остановимся на основных особенностях конструкции электромобилей. Они обусловлены следующими специфическими проблемами:

обеспечением баланса массы электромобиля при относительно очень большой массе источника энергии в виде тяговой аккумуляторной батареи;

пространственным размещением тяговой аккумуляторной батареи значительного объема, обеспечивающим приемлемые показатели конструкции электромобиля при достаточном удобстве в эксплуатации; заметим, что эти требования в известной мере противоречат друг другу;

отоплением салона или кабины водителя.

Последняя проблема до некоторого времени не привлекала внимания широкого круга специалистов, особенно за рубежом. Однако для зимних условий нашей страны при общем дефиците энергии на электромобиле она оказывается весьма существенной. Опыт показывает, что для обеспечения приемлемых условий в кабине водителя и для достаточно быстрого размораживания ветрового стекла необходима мощность порядка 3—6 кВт, которая соизмерима с мощностью, потребной для движения электромобиля.

Другие особенности конструкции электромобиля определяются специфическими возможностями электрических тяговых систем, которые состоят в основном в следующем:

высокие регулировочные качества электродвигателей в принципе позволяют получить требуемые пределы изменения скорости движения без переключения передач;

малые габариты и массы узлов электропривода значительно расширяют возможности компоновки привода ведущих колес;

улучшенные тормозные свойства электрических тяговых систем позволяют в определенной мере упростить механические тормозные системы.

Кроме того, внутригородское использование современных электромобилей с ограниченной максимальной скоростью и при сравнительно хорошем качестве дорог позволяет снизить требования по ряду конструктивных характеристик узлов и агрегатов, что создает предпосылки для определенного упрощения их по сравнению с обычными автомобильными.

Создание электромобиля может осуществляться двумя способами:

путем использования базовой конструкции серийного автомобиля близкого класса; такое переоборудование называется конвертированием;

разработкой принципиально новой конструкции.

Несмотря на внешнюю привлекательность (причем даже для специалистов) второго способа, подавляющее большинство современных электромобилей создается методом конвертирования. Это, в особенности, относится к первым трем типам электромобилей,

приведенным в табл. 1.3. Принципиальная возможность конвертирования для грузовых электромобилей основывается на допустимости замены части полезной нагрузки массой аккумуляторной батареи. Что же касается конструкции легкового электромобиля типа 4 (табл. 1.3), то она оказывается достаточно специфичной из-за относительно большого для этого типа машин объема тяговой батареи. Способом конвертирования можно создать легковой электромобиль очень невысоких потребительских качеств, т. е., например, двухместный из четырех-пятиместного автомобиля. В связи с этим серийноспособные легковые электромобили разрабатываются, как правило, оригинальной конструкции.

Создание конвертированных электромобилей в настоящее время имеет серьезное экономическое основание из-за значительно более низкой стоимости автомобилей и автомобильных агрегатов, производимых методами крупносерийного и массового производства. Очевидно, что по мере повышения эффективности источников тока и уровня серийноспособности электромобилей будут расти и предпосылки разработки оригинальных конструкций электромобилей и агрегатов для них.

Выше указывалось, что основной путь обеспечения весового баланса грузовых электромобилей, а также микроавтобусов-электротакси состоит в снижении полезной нагрузки и выделения за счет этого необходимой массы тяговой батареи. Одновременно обычно изыскиваются возможности по снижению массы агрегатов и кузова конвертируемого автомобиля. Получаемое при этом распределение массы по основным частям электромобиля, усредненное по ряду отечественных и зарубежных электромобилей, приведено в табл. 1.4. Для сравнения в этой таблице приведены данные по весовому балансу электромобилей оригинальной конструкции, в которых используются серийные автомобильные узлы. Эти данные дают представление о среднем уровне экономии массы электромобиля для батарей и полезной нагрузки, достигнутом в мире.

Однако при этом представляют существенный интерес некоторые индивидуальные характеристики. Для конвертированного электромобиля ЕТ (*Electro Transporter*) фирмы «Фольксваген» (*Volkswagen*), компоновка которого показана на рис. 1.2, относительная полезная нагрузка составляет 0,26 при относительной массе батареи 0,23, т. е. он вполне соответствует среднему уровню несмотря на предпочтение, отданное полезной нагрузке по некоторым основаниям, о которых будет сказано далее. В оригинальном по конструкции японском электромобиле EV4H достигнуто удачное соотношение: полезная нагрузка — 0,297, масса тяговой батареи — 0,292 при весьма высокой их сумме — 0,589.

В то же время следует заметить, что стремление некоторых фирм к рекламным показателям запаса хода проявляется в изменении оптимального по полезной транспортной работе соотношения в сторону увеличения массы тяговой батареи. Об этом сви-

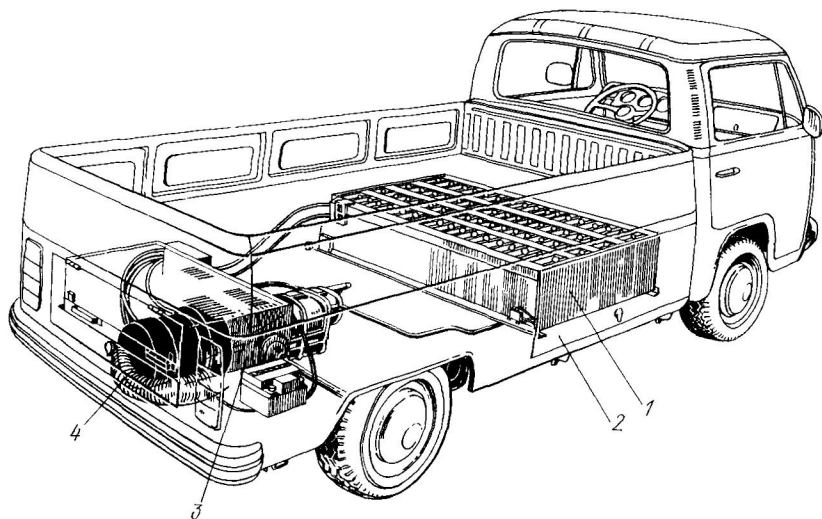


Рис. 1.2. Грузовой электромобиль ET фирмы «Фольксваген»:

1 — аккумуляторная батарея; 2 — установочная платформа батарей; 3 — трансмиссия; 4 — электродвигатель

детельствуют и средние показатели, но наглядным примером может служить электромобиль EV-600 фирмы «Джет индастриз» (Get Industries), у которого при массе тяговой батареи 0,337 полезная нагрузка составляет только 0,192. В связи с этим объективная оценка качества электромобиля должна учитывать оба показателя.

Таблица 1.4

Величина относительной массы конвертированной и оригинальной конструкции электромобилей

Узел, агрегат, часть	Масса, отнесенная к полной массе	
	для конвертированного	для оригинального
Экипаж с водителем:	0,452	0,408
кабина в сборе	0,120	0,110
кузов в сборе	0,076	0,060
рама	0,060	0,048
агрегаты шасси	0,196	0,190
Тяговая система:	0,323	0,318
электропривод,	0,059	0,054
в том числе:		
электродвигатель	0,042	0,036
контроллер	0,017	0,018
тяговая батарея	0,264	0,282
Полезная нагрузка	0,224	0,274
Полезная нагрузка и тяговая батарея в сумме	0,488	0,556

Из табл. 1.4 следует, что оригинальные конструкции электро-мобилей позволяют повысить в среднем на 22 % полезную на-грузку при одновременном увеличении запаса хода на 7 %, но достигается это при достаточно высоком уровне затрат. Что ка-сается разницы в относительной массе электропривода, то она объясняется, во-первых, использованием в электромобилях ори-гинальных конструкций более новых разработок электродвига-телей и, во-вторых, некоторым улучшением характеристик коэф-фициента сопротивления движению, в результате которого появ-ляется возможность снизить мощность тягового электродвигателя.

Решение проблемы весового баланса грузовых электромобилей определяет и компоновочное решение по размещению тяговой батареи. Типичное размещение батареи показано на рис. 1.2 для открытого грузового электромобиля ЕТ фирмы «Фольксва-ген». Батарея располагается между передней и задней осями элек-тромабиля (так называемое расположение «в базе») с некоторым смещением к передней оси, чтобы улучшить распределение массы по осям. Боковые люки позволяют выдвигать блоки батарей в сто-рону и производить быструю их смену. Эта операция и устрой-ства ее механизации показаны на рис. 1.3 для электро микро-автобуса той же фирмы. Быстрая смена батарей является осно-ванием для упоминавшегося выше уменьшения относительной массы батарей в пользу полезной нагрузки. На рис. 1.2 показано также расположение электродвигателя 4 и трансмиссии 3, осуще-ствляющих привод на задние колеса. Очевидна нетрадиционность показанного конструктивного решения, возможность которого обусловлена малой массой и габаритными размерами электродви-гателя. Такая компоновка выбрана в основном исходя из удобства обслуживания тягового электродвигателя.

Другой пример типовой компоновки для семейства японских электромобилей Е2 показан на рис. 1.4. Унифицированная рамная

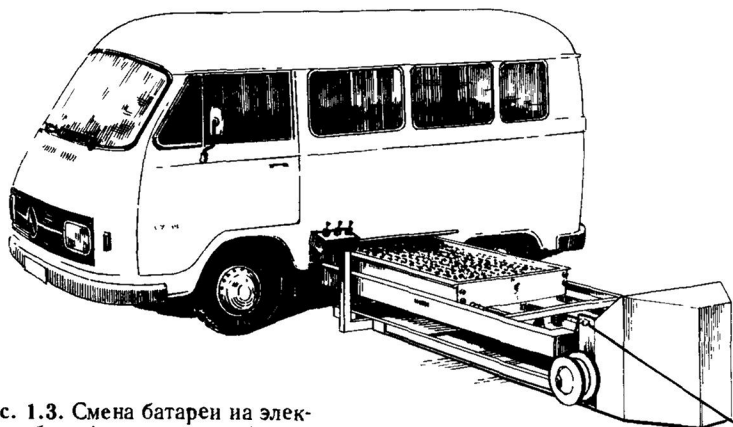


Рис. 1.3. Смена батарей на элек-
тромобиле-фургоне фирмы
«Фольксваген»

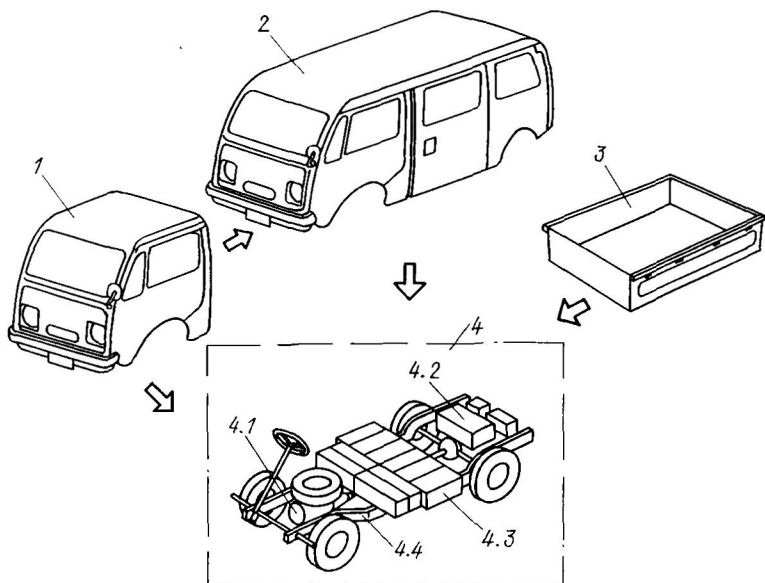


Рис. 1.4. Принципы компоновки семейства электромобилей E2:

1 — кабина исполнения пикап; 2 — кузов исполнения фургон; 3 — платформа исполнения пикап; 4 — унифицированное шасси; 4.1 — электродвигатель; 4.2 — контроллер; 4.3 — тяговая батарея; 4.4 — несущая рама

конструкция предусматривает размещение «в базе» двух блоков тяговой батареи. Электродвигатель с передним продольным расположением осуществляет привод на задние колеса через карданный вал и дифференциал обычного для автомобилей типа. Контроллер размещен в задней части рамы. На унифицированное шасси могут устанавливаться кузова и кабины различных исполнений семейства электромобилей.

Фотографии отечественных электромобилей ЕрАЗ-3732 и ВАЗ-2702 показаны на рис. 1.5 и 1.6. Оба эти электромобиля также имеют батареи «в базе» с выемкой в сторону. Следует отметить, что рама, кабина и кузов электромобиля ВАЗ-2702 выполнены целиком из алюминиевых сплавов, что позволило снизить относительную массу экипажа с водителем до значения 0,392.

В семействе английских электромобилей «Лукас-Бедфорд» (*Lucas-Bedford*), выполненных на единой конструктивной базе, грузовой фургон имеет удачное соотношение масс батареи и полезной нагрузки: 0,286 и 0,286. Привод на задние колеса осуществляется от двигателя, расположенного сзади. Построение семейств электромобилей дает значительные преимущества (в том числе экономические) и принято как принцип разработок основными ведущими фирмами.



Рис. 1.5. Электромобиль EpA3-3732

Другое направление компоновки тяговых батарей представлено на рис. 1.7 применительно к итальянским электромобилям «Фиат-900E/E2» (*Fiat 900E/E2*). Здесь батарея разделена на два блока, один из которых расположен «в базе», а другой — за задней осью. Такое разделение в определенной мере затрудняет эксплуатацию и быструю смену батарей. Двигатель и трансмиссия расположены в непосредственной близости от ведущих колес, что по опубликованным фирмой «Фиат» (*Fiat*) данным снижает трудоемкость электромобиля на 8—13 % и материалоемкость на 6—9 %.

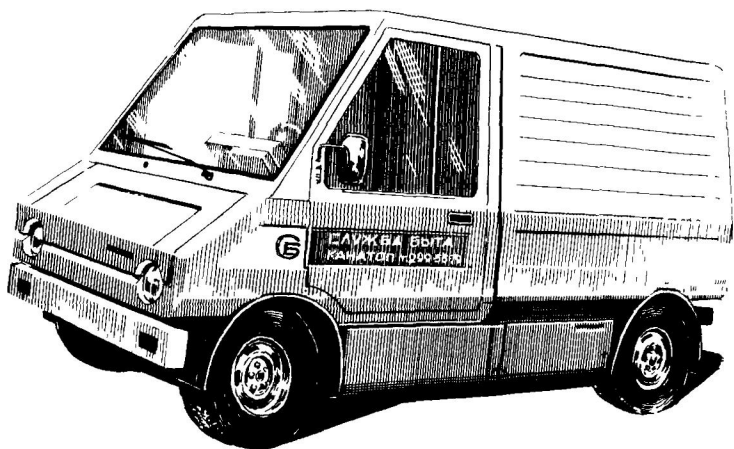


Рис. 1.6. Электромобиль BA3-2702

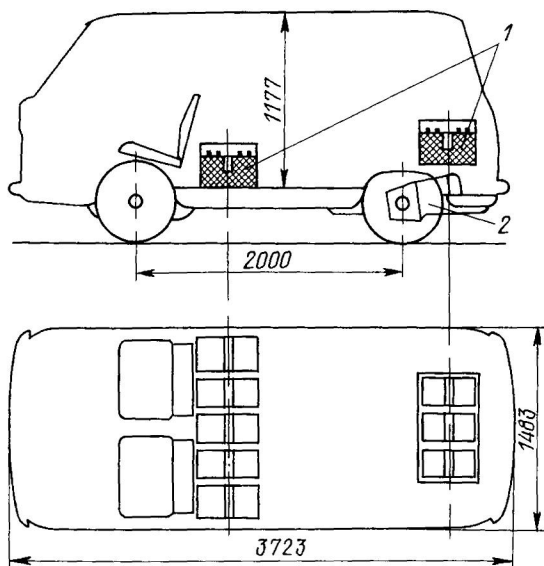


Рис. 1.7. Расположение тяговых батарей в электромобилях «Фиат-900 E/E2»: 1 — тяговые батареи, 2 — электродвигатель

Задача создания легковых электромобилей является значительно более сложной из-за того, что тяговая батарея представляет собой новый дополнительный элемент баланса массы, который не может быть установлен за счет полезной нагрузки. Кроме того, к легковым транспортным средствам предъявляются более высокие требования, в том числе и по запасу хода, чем к грузовым. По данным министерства энергетики США для создания серийноспособных электромобилей должен быть достигнут следующий уровень удельной энергоемкости и мощности источников тока: для пассажирского городского электромобиля — 70 Вт·ч/кг и 80 Вт/кг; для «семейного» электромобиля — 220 Вт·ч/кг и 150 Вт/кг.

Несмотря на то, что такие показатели в доступных для применения источниках тока еще не получены, различными фирмами разрабатываются легковые электромобили обоих типов. Среди них (как и среди грузовых электромобилей) можно выделить конвертированные и оригинальные конструкции.

Проблема массы в легковых электромобилях решается в основном за счет увеличения полной массы по сравнению с автомобилем того же класса. Этот путь является вынужденным, так как превышение массы ведет к повышению расхода энергии при движении. Кроме того, именно для легковых электромобилей изыскиваются все меры для экономии массы кузова и электропривода, даже ценой дополнительных затрат.

Рассмотрим связь массы батарей с массой электромобиля. Необходимая для обеспечения запаса хода L масса батарей может быть определена из уравнения баланса энергии

$$eG_B = \omega L (G_a + G_3 + G_B + G_n) 10^3, \quad (1.1)$$

где e — удельная энергоемкость батарей, Вт·ч/кг; ω — удельный расход энергии при движении в режиме, для которого задан запас хода, Вт·ч/(т·км); G_a — масса экипажной части, кг; G_3 — масса электропривода, кг; G_n — полезная нагрузка, кг.

В явном виде масса батарей из выражения (1.1) может быть определена по формуле

$$G_B = \frac{10^3 \omega e (G_a + G_3 + G_n)}{e - 10^{-2} \omega L}. \quad (1.2)$$

Для определения порядка величины G_B рассмотрим в качестве примера конвертирования автомобиль класса ВАЗ-2101, причем массу неснаряженного автомобиля будем считать неизменной $G_a = 890$ кг. Масса электропривода (ориентировочно) $G_3 = 100$ кг и полезная нагрузка, учитывая четырех пассажиров и 40 кг багажа, $G_n = 320$ кг. При удельной энергии батарей $e = 70$ Вт·ч/кг, достижимом удельном расходе энергии в городском режиме движения $\omega = 100$ Вт·ч/кг и запасе в том же режиме $L = 150$ км имеем массу батарей в килограммах

$$G_B = \frac{100 \cdot 10^{-3} \cdot 150 (890 + 100 + 320)}{70 - 100 \cdot 10^{-3} \cdot 150} = 357 \approx 360.$$

При этом полная масса электромобиля в килограммах составит:

$$G = G_a + G_3 + G_n + G_B = 890 + 100 + 320 + 360 = 1670,$$

что не выходит, в принципе, за пределы допустимого значения для машин этого класса (в частности, по нагрузочной способности автомобильных узлов и агрегатов с учетом внутригородского использования и снижения максимальной скорости). Этот пример показывает обоснованность вышеизложенных требований к удельной энергоемкости батарей.

Более низкие показатели по удельной энергоемкости современных батарей существенно ухудшают получаемые результаты. Примером этого может служить электромобиль «Ситиштремер» (*Sittistreumer*), конвертированный из автомобиля «Гольф» (*Golf*) фирмы «Фольксваген». Его параметры при использовании панцирной свинцово-кислотной батареи на 140 А·ч и 96 В с удельной энергоемкостью 25 Вт·ч/кг приведены в сравнении с базовым автомобилем в табл. 1.5.

В конвертированном электромобиле (как следует из таблицы) не только не удается снизить массу автомобильной (экипажной) части, но более того, при установке тяговой батареи с большой

Технико-эксплуатационные показатели конвертированного
автомобиля в электромобиль

Автомобиль	Масса без нагрузки, кг	Полезная нагрузка, кг	Полная масса, кг	Запас хода, км	Разгон до 50 км/ч, с	Максимальная скорость, км/ч	Масса батареи, кг
«Ситиштремер»	1350	250	1600	65	13,0	84	400
«Гольф»	760	440	1200	400	4,8	141	—

дополнительной массой требуется введение новых конструктивных элементов, увеличивающих массу. Из таблицы следует, что это увеличение в данном случае составляет 190 кг.

Другая дополнительная сложность при конвертировании состоит в изыскании объема для размещения тяговой батареи. В условиях современного легкового автомобиля высокая рациональность использования объема кузова почти не оставляет для этого возможностей. В автомобиле «Гольф» при его конвертировании такое место было найдено в багажном отсеке за задними сиденьями. Однако это решение представляется сомнительным по причинам распределения масс по осям: задняя ось при полной нагрузке, очевидно, является перегруженной, что не может не отразиться на эксплуатационных качествах.

По перечисленным выше причинам основной путь создания пассажирских городских электромобилей состоит в разработке оригинальных конструкций, обеспечивающих решение основных проблем весового баланса и компоновки батареи большого объема. В табл. 1.6 приведены составляющие массы легкового автомобиля и возможные пути ее снижения для городских электромобилей.

Из табл. 1.6 следует, что при создании оригинальной конструкции легкового электромобиля возможно снижение массы экипажной части относительно некоторого базового автомобиля примерно на 32 %. Если в качестве базового автомобиля принять ВАЗ-2101, то абсолютная экономия масс в килограммах составит

$$G_1 = 0,32 \times 890 = 285.$$

Однако в весовом балансе (табл. 1.5) еще не учтены такие узлы электромобиля, как контроллер, система отопления и др. Можно ориентировочно оценить массу этих систем в 50 кг. При ранее принятой полезной нагрузке необходимая масса батареи в килограммах согласно выражению (1.2) составит

$$G_B = \frac{100 \cdot 10^{-3} \cdot 150 \cdot 0,68 (890 + 50 + 320)}{70 - 100 \cdot 10^{-3} \cdot 150} = 266 \approx 270.$$

Таким образом, достижимая в этих условиях полная масса электромобиля составит $G = 1250$ кг.

Рассмотренные два случая позволяют считать принципиально возможным создание городского пассажирского электромобиля, удовлетворяющего достаточно общим требованиям, с полной массой, находящейся в выше установленных пределах, т. е. $1250 \leq G \leq 1670$ кг.

Поиск рациональных компоновочных решений для электромобилей специальных конструкций приводит к варианту туннельного размещения тяговой батареи, который в настоящее время считается наиболее перспективным. В качестве примера такой компоновки на рис. 1.8 показана разработка для электромобиля «Эндюра» (*Endura*) фирмы «Глоб Унион» (*Globe Union*). Оказывается, что при туннельной компоновке полная (расчетная) масса находится в пределах 1450 кг при массе свинцово-кислотной батареи 590 кг и достаточно большом ее объеме. При этом сохраняется и удобство эксплуатации, так как предусмотрена быстрая смена батареи выдвижением ее из туннеля вперед. Электродвигатель и трансмиссию располагают сзади за туннелем батареи поперек оси электромобиля, и осуществляют привод на задние колеса.

Близкая по основной идее компоновка батареи предусматривается в переднеприводном электромобиле ETV-1 совместной раз-

Таблица 1.6

Показатели составляющих массы электромобиля

Узел, деталь	Масса, отнесенная к массе экипажа автомобиля			За счет каких изменений достигнуто снижение массы в электромобиле
	средняя	наименьшая	достижимая в электромобиле	
Кузов	0,330	0,243	0,290	—
Внутренняя отделка	0,142	0,106	0,100	Уменьшение звукоизоляции
Стекла	0,032	0,022	0,022	—
Двигатель	0,151	0,118	0,075	Меньшая мощность
Трансмиссия	0,047	0,039	0,020	Упрощение
Подвеска	0,060	0,041	0,040	Снижение нагрузок
Колеса	0,057	0,042	0,042	—
Тормоза	0,038	0,031	0,030	Электрическое торможение
Рулевое управление	0,016	0,012	0,012	—
Задний мост	0,043	0,036	0,036	—
Система выпуска	0,013	0,003	—	Исключена
Электрооборудование	0,013	0,010	0,010	—
Радиатор	0,014	0,007	0,010	—
Топливный бак	0,044	0,035	—	Исключена
Всего:	1,000	0,745	0,680	—

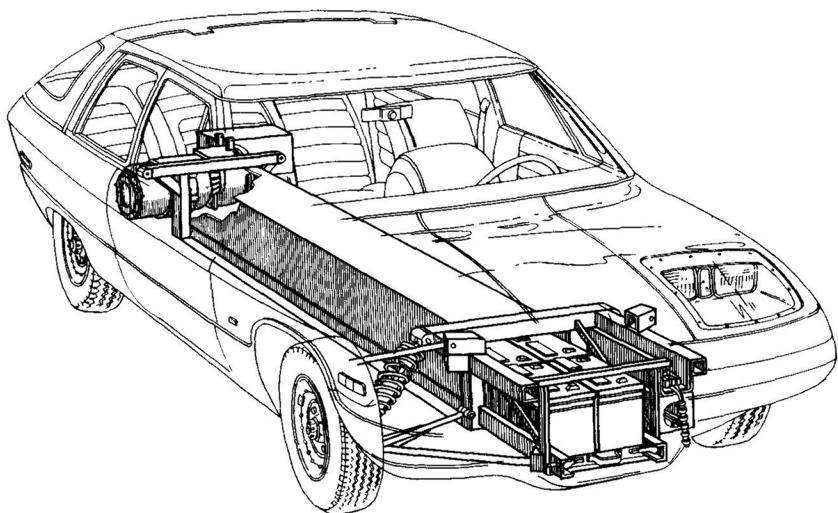


Рис. 1.8. Расположение батареи в электромобиле фирмы «Глоб Унион»

работки фирм «Дженерал Электрик-Крайслер» (*General Electric — Crusler*). Здесь батарея занимает туннель в зоне задних колес. Единая компоновка электродвигателя с редуктором и дифференциалом оказывается весьма рациональной (особенно для расположения привода на передней оси) и может быть использована как основа для широкой унификации узлов привода семейств электромобилей.

В разработках легковых электромобилей ряда фирм используется компоновочная схема с размещением двух блоков тяговой батареи в передней и задней частях электромобиля. Примером может служить компоновка электромобиля EV2 (Япония), показанная на рис. 1.9. При показанном размещении блоков батарей и расположении основных узлов электропривода в задней части электромобиля распределение массы по передней и задней осям оказывается вполне удовлетворительным. Привод осуществляется на задние колеса. Следует отметить, что этот электромобиль разрабатывался в расчете на комбинированный источник питания в виде высокоэнергетической топливной батареи системы «цинк—воздух» с удельной энергоемкостью 130 Вт·ч/кг и буферной свинцово-кислотной батареи с высокой пиковой мощностью (стартерного типа). Так как зарядка топливной батареи состоит только в замене контейнера с суспензией цинка, а буферная батарея не требует зарядки, то двухобъемная компоновка источника тока является естественной и не создает неудобств в эксплуатации. Однако перенесение принципов двухобъемной компоновки на низкоэнергетические источники обычного типа вряд ли является обоснованным.

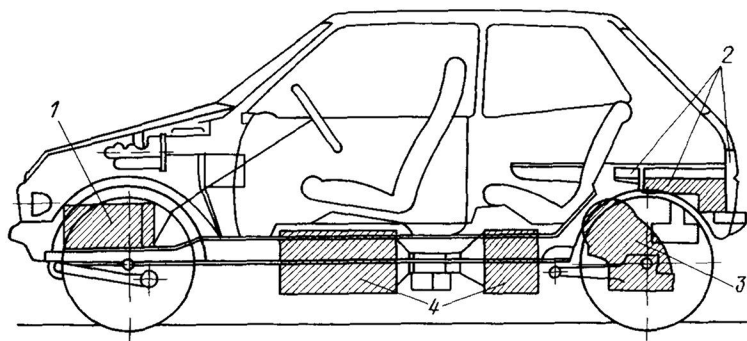


Рис. 1.9. Компоновка легкового электромобиля EV2, Японии:

1 — буферная свинцово-кислотная аккумуляторная батарея; 2 — контроллер, 3 — тяговый привод; 4 — основной источник энергии системы цинк—воздух

Трудности весового баланса привели в 70-х годах к появлению и развитию различных вариантов открытого исполнения легкового электромобиля. Простой открытый кузов из легких материалов (типа пластмасс) позволяет резко уменьшить массу экипажной части и обеспечить возможность установки низкоэнергетической батареи значительной массы (относительная масса может достигать величин 0,35—0,40). Заводом в г. Мележе (Польша) производился в довольно больших количествах открытый электромобиль «Мелекс» со свинцово-кислотными батареями фирмы «Варта» (*Varta*). Однако низкие потребительские качества таких электромобилей, особенно для районов с умеренно холодным климатом, привели к довольно быстрому падению спроса на них.

Можно отметить, что в 70-х годах небольшие фирмы в разных странах пытались производить сверхмалые легковые электромобили оригинальной (очень упрощенной) конструкции: «Ситикар» (*Citycar*, США); «Энфилд-8000» (*Anfield 8000*, Англия), «Пилкар» (*Pilcar*, Швейцария); «Дельта-2» (*Delta 2*, ФРГ) и ряд других. Однако низкие эксплуатационные свойства — запас хода около 50—70 км, длительная перезарядка, сложное обслуживание и относительно высокая начальная стоимость привели к практическому прекращению их производства в начале 80-х годов.

Проблема отопления электромобилей для районов с умеренным и умеренно холодным климатом является сопутствующей, но немаловажной для создания серийноспособных электромобилей. Разумеется, при наличии достаточного запаса энергии источника тока она решается простыми средствами. Однако в настоящее время пути ее практического решения связаны (как это ни покажется парадоксальным) с применением бензиновых или газовых отопителей. Неудобства применения таких качественно неоднородных энергоносителей очевидны. Кроме того, для отопителей

упомянутого типа требуется ощутимая дополнительная масса, которая в основном связана с хранением запаса топлива. Такие отопители удорожают электромобиль даже в случае применения, например, унифицированных отопителей автомобилей ЗАЗ, что предусматривалось в ряде отечественных электромобилей.

Идея использования для обогрева энергии потерь в тяговой системе оказалась пока неэффективной, во-первых, из-за относительной малости этой энергии (мощность потерь в двигателе в среднем составляет 1,5—2,0 кВт, а для обогрева необходимо 3—6 кВт) и, во-вторых, из-за сложности использования этой энергии. Эту сложность определяет ряд обстоятельств: одновременность тепловых потерь и потребности в обогреве, высокий теплоотвод через поверхности агрегатов в зимнее время при высоком перепаде температур, что требует создания системы теплоизоляции агрегатов, которая оказывается вредной в летнее время, когда отопления не требуется. Проблему автономного отопления в современных условиях приходится считать нерешенной. Остается лишь вариант разогрева и поддержания температуры с помощью обогревателя, питаемого от сети (одновременно с зарядкой батарей).

1.3. ТЕХНИКО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Анализ опубликованных характеристик однотипных электромобилей, созданных в различные периоды, позволяет судить о достигнутом уровне развития данного типа транспортных средств.

В связи с этим рассмотрим статистику технико-эксплуатационных показателей электромобилей, созданных в различные годы.

Вместимость и грузоподъемность электромобилей. Начиная с 1967 по 1982 гг., в мире разрабатывалось почти в три раза больше образцов легковых электромобилей, чем электробусов. Это обусловлено тем, что за рубежом большую часть транспортных средств составляют легковые автомобили и для их частичной замены осуществлялось создание электромобилей.

Разрабатываемые в последние два десятилетия легковые электромобили имеют вместимость от одного до пяти человек. При этом более половины из них конструируются двухместными, иногда с расчетом на перевозку дополнительного багажа массой от 100 до 250 кг. Более четверти из них создаются четырехместными, причем в последние годы эта тенденция усиливается. Примерно 10 % электромобилей являются одноместными и порядка 7 % — пятиместными. Кроме того, имеются отдельные образцы трехместных электромобилей.

Значительное число образцов двухместных электромобилей обусловлено тем, что они проектируются как городские транспортные средства, предназначенные для короткопробежных деловых поездок. Кроме того, как указывалось выше, это позволяет увеличить массу аккумуляторных батарей при конвертировании из

Основные технико-эксплуатационные характеристики легковых
электромобилей различной вместимости

Электромобиль, фирма-изготовитель, страна	Вместимость, чел.	Масса электро-мобля, т	Запас хода, км	Максимальная скорость, км/ч
ДВС-1, «Дайхацу Кого» (<i>Deihatsu Kogyo</i> , Япония)	1 + 90 кг	1,432	50,0	40
«Ситикар», «Себринг Вангард» (<i>Sebring Vanguard</i> , США)	2	0,574	80	60
Электромобиль на базе «Фиат-500» «Фиат», Италия)	3	0,530	100	50
Трансформер-1 (<i>Transformer I</i>), «Электрик Фул Эл Пропалшн» (<i>Electric Fuel Propulsions</i> , США)	4	2,664	190 *	112
«Электровейер-II», (<i>Elektrovair II</i>), «Дженерал Моторс» (<i>General Motors</i> , США)	5	1,545	130 **	125

* Свинцово-кобальтовая аккумуляторная батарея
** Серебряно-цинковая аккумуляторная батарея.

четырёх-, пятиместного автомобиля и, как следствие, повысить запас хода электромобля.

В табл. 1.7 приведены характеристики некоторых образцов электромобилей различной вместимости.

В последние годы было создано достаточно много опытных образцов электробусов. По вместимости их можно условно подразделить на три группы: малой — до 20 чел., средней — 20—60 чел., большой — более 60 чел.

Следует отметить, что работы над созданием электробусов всех групп ведутся в последние годы с высокой интенсивностью.

В табл. 1.8 приведены некоторые технико-эксплуатационные показатели электробусов различной вместимости.

Из таблицы следует, что по вместимости электробусы не уступают аналогичным автобусам с ДВС.

Среди образцов опытных грузовых электромобилей наибольшее распространение получили электромобили небольшой грузоподъемности 0,8—1,5 т. Однако большая часть электромобилей, выпускавшихся серийно в Великобритании, имели грузоподъемность 0,8—3,0 т. Более высокой грузоподъемностью обладают электромобили французской фирмы «Софель» (*Sofel*) — 4—11 т. Как правило, они оборудуются свинцово-кислотными аккумуляторными батареями, имеющими невысокую энергоёмкость, поэтому запас хода этих электромобилей составляет всего 30—60 км.

**Технико-эксплуатационные показатели электробусов
различной вместимости**

Электробус, фирма-изготовитель, страна	Вместимость, чел	Масса электробуса, т	Запас хода, км	Максимальная скорость, км/ч
«Модель 20», «Отис Электровейер» (<i>Otis Elefator Co.</i> , США)	20	5,67	88	63
Без наименования, «Сайлент рай- дэ» (<i>Silent Rider</i> , Англия)	50	16,0	64	64
МАН (<i>MAN</i>), МАН (<i>MAN</i> , ФРГ)	Более 100	16 + 5,4 *	50	70

* 5,4 тонны — масса прицепа с аккумуляторными батареями.

Проводятся также исследования по созданию электромобилей малой грузоподъемности — до 0,5 т. Как правило, такие электромобили конструируются на базе легковых автомобилей.

В табл. 1.9 приведены характеристики некоторых опытных образцов грузовых автомобилей.

Динамические качества электромобилей. Величина максимальной скорости электромобиля определяется в основном требованиями внутригородского использования.

Можно отметить, что наблюдается некоторый рост максимальных значений скоростей разрабатываемых электромобилей, что показано на графике, приведенном на рис. 1.10. При построении графика были рассчитаны средние значения максимальных скоростей электромобилей, разработанных за последние 20 лет. Из графика следует, что максимальные скорости легковых и грузовых электромобилей, созданных в последние годы, превышают 60 км/ч, т. е. максимально допустимую скорость для движения транспортных средств в условиях города и имеют некоторую тенденцию дальнейшего роста. Это обстоятельство можно объяс-

Таблица 1.9

**Технико-эксплуатационные показатели опытных образцов
грузовых электромобилей**

Электромобиль, фирма-изготовитель, страна	Грузоподъемность, т	Масса электромобиля, т	Запас хода, км	Максимальная скорость, км/ч
P-500, «Отис Электровейер», США	0,36	1,8	80	71
ЕМА-2, Чехословакия	1,05	2,05	80	40
ЕрАЗ-3732 (Ереванский автозавод, СССР)	0,9	1,925	80	60
«Фольксваген» («Фольксваген», ФРГ)	0,8	2,60	75	75

нить усложнением условий движения в городе и необходимостью запаса скорости для совершения обгона в определенных условиях. При этом наблюдается сближение величин максимальных скоростей легковых и грузовых электромобилей.

Ускорение и разгон электромобилей. Электромобили по параметру «ускорение разгона» незначительно уступают автомобилям с ДВС. Так, опытный электромобиль ВАЗ-2801, имеющий грузоподъемность 0,2 т, обеспечивает разгон до 60 км/ч за 15 с. Достоинством электромобилей является то, что они

обладают более плавным разгоном, чем автомобили. Это объясняется отсутствием у них переключений передач и хорошими регулировочными свойствами электропривода. В табл. 1.10 для сравнения приведены данные о времени разгона электромобиля «Электровейер» и базового автомобиля «Корвейер» (*Corwyer*).

На электромобилях ХАДИ-13Э и «Электровейер» устанавливались серебряно-цинковые аккумуляторные батареи, что в значительной степени способствовало повышению их динамических качеств. Несколько ниже динамичность электромобилей со свинцово-кислотными аккумуляторными батареями. Однако следует отметить, что лучшие образцы электромобилей со свинцово-кислотными аккумуляторными батареями при достаточно большой их мощности не уступают по величине максимального ускорения при разгоне автомобилям с механической трансмиссией. Так,

выпущенные в 1974 г. японской фирмой «Дайхатсу Кого» грузовые электромобили разгонялись до скорости 30 км/ч за 2,3—4,2 с, т. е. с ускорением 3,6—2,98 м/с². При этом они обладали максимальной скоростью 90 км/ч.

Приемлемыми динамическими характеристиками обладают также выпущенные в последние годы электробусы. Так, электробус английской фирмы Лукас (*Lucas*) вмес-

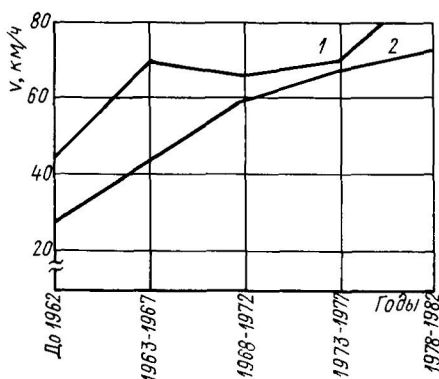


Рис. 1.10. Изменение средних значений максимальных скоростей электромобилей, созданных в различные периоды времени:

1 — легковые; 2 — грузовые

Таблица 1.10

Время разгона электромобиля «Электровейер» и базового автомобиля «Корвейер»

Скорость, км/ч	Время разгона, с	
	Автомобиль	Электромобиль
0—32	3,0	6,0
32—64	4,4	4,1
64—96	8,4	6,6
0—96	15,8	16,7

тимостью 34 человека разгоняется до скорости 48 км/ч за 15 с, т. е. движется со средним ускорением $0,9 \text{ м/с}^2$.

Таким образом, по своим динамическим характеристикам электромобили незначительно уступают аналогичным автомобилям с ДВС. Опыт показал, что при эксплуатации в городских условиях они хорошо вписываются в транспортный поток, не вызывая заметных сбоев его на всех этапах движения — при разгоне, движении с постоянной скоростью, торможении.

Проблема запаса хода. Запас хода электромобилей в значительной мере определяется типом используемого источника тока. Подробный анализ возможных для применения в электромобилях источников тока приводится в гл. 2. Целесообразно предварительно остановиться на некоторых вопросах технико-экономического анализа, цель которых состоит в выявлении проблемы и тенденции развития в этой области.

Известны (причем достаточно давно) источники тока с весьма высокой энергоемкостью. К их числу можно отнести в первую очередь серебряно-цинковые аккумуляторные батареи. При удельной энергии этих батарей около 120 Вт·ч/кг реально достигнутый запас хода электромобиля типа ВАЗ-2801 (на базе автомобиля ВАЗ-2102) оказался равным примерно 300 км. Однако стоимость аккумуляторной батареи массой 320 кг составила около 100 тыс. руб. Хотя основная часть этой стоимости (определяемая нерасходуемым запасом серебра) не изменяется при эксплуатации батареи вплоть до окончания ее ресурса, установка таких дорогих устройств на серийный электромобиль исключена по ряду причин.

Имеются и менее экзотические примеры дорогостоящих источников тока. В частности, на ряде отечественных и зарубежных электромобилей использовались никель-цинковые аккумуляторные батареи. При сравнительно высокой удельной энергоемкости (46—50 Вт·ч/кг) и большой допустимой мощности эти батареи показали в условиях реальной эксплуатации очень низкий срок службы — порядка 100—150 циклов заряд—разряд. Начальная стоимость такой батареи 10—15 тыс. руб., при этом амортизировалась на пробеге около 10—12 тыс. км. Легко подсчитать, что амортизация батареи, отнесенная к пробегу, составила очень большую величину, т. е. порядка 100—150 руб. на 100 км.

Разумеется, что при таких экономических показателях получаемые запасы хода не имеют практической ценности.

Изложенное выше показывает теснейшую связь, существующую между запасом хода электромобиля и стоимостными характеристиками установленной на нем аккумуляторной батареи, включая начальную стоимость батареи; затраты по ее эксплуатации; срок службы батареи.

Проблема создания серийно пригодного источника тока для электромобилей является поэтому не только технической, но и экономической. Однако этой связи техники и экономики до сих пор уделялось недостаточное внимание. В равной мере допу-

скались две ошибки: ориентация на наиболее дешевые источники тока, в частности, свинцово-кислотные; стремление получить запас хода «любой ценой».

Таким образом, существует достаточно сложная задача определения (или точнее прогнозирования) экономически обоснованной лимитной стоимости создаваемого источника тока для электромобилей. Эта задача не является строго поставленной, так как содержит ряд неопределенностей, раскрываемых только в процессе создания источника тока. Можно считать, что решение будет найдено в результате некоторого итеративного процесса. Важно однако иметь в этом процессе достаточно близкие первые приближения. Поясним это следующим примером.

Задаваясь некоторым гипотетическим источником тока (например, удельной энергией 60—70 Вт·ч/кг. начальной стоимостью в 2000 руб. и эксплуатационными расходами на батарею 1 коп./км пробега), заказчик ориентирует создателя источника тока на довольно узкий класс возможных объектов разработки. Может оказаться в дальнейшем, что этот вариант ошибочен (как это имело место с никель-цинковой батареей) и ущерб от неправильного первого приближения велик настолько, что его даже трудно оценить. Такой ущерб уже понесли практически все развитые страны мира в период интенсивных разработок электромобилей в 70-х годах.

При формулировке технико-экономических требований первого приближения (по мнению авторов) чрезвычайно важно не оставить в стороне количественную оценку социально-экологических последствий частичной замены автомобильного парка в крупных городах электромобилями.

В связи с этим в книге предпринята попытка учесть в экономических показателях создаваемых электромобилей и источников тока для них народнохозяйственную экономию в результате улучшения воздушной среды в крупных городах. Часть этой народнохозяйственной экономии может быть направлена на возмещение повышенной стоимости источников тока, принципиально превышающей допустимый уровень эксплуатационных расходов. Этот вопрос будет проанализирован более подробно в гл. 2 и 6. Сейчас важно подчеркнуть возможность рассмотрения в рамках всей проблемы источников тока различной (в том числе повышенной) стоимости.

С учетом этих обстоятельств можно наметить в качестве первого приближения следующие границы запаса хода электромобилей различных типов в реальных условиях эксплуатации.

Запас хода электромобилей в настоящее время является сравнительно небольшим, что в значительной степени обусловлено характеристиками химических источников тока, устанавливаемых на них. По имеющимся в технической литературе данным (в том числе рекламным) величина запаса хода для отдельных электромобилей изменяется в широком диапазоне от 45 до 240 км. Это

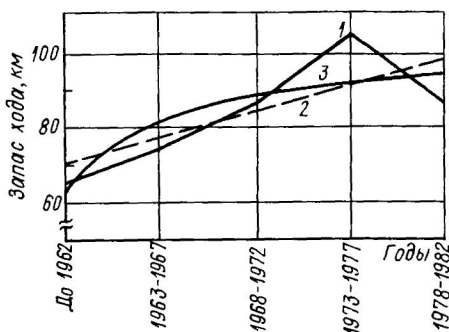


Рис. 1.11. Изменение средней величины запаса хода опытных образцов грузовых электромобилей:

1 — средняя величина запаса хода; 2 — аппроксимация кривой Гомперца; 3 — аппроксимация кривой гиперболой

в группы по периодам их создания, а запас хода для каждой группы рассчитан как среднее арифметическое. Для электромобилей и электробусов производства 1978—1982 гг. наблюдается некоторое снижение запаса хода. Это обусловлено, главным образом, тем, что запас хода для них в технической литературе приведен для реальных городских условий эксплуатации. Для электромобилей более ранних лет выпуска нередко указывался максимальный запас хода при движении его с постоянной скоростью. В этом случае величина запаса хода увеличивается, так как заметно снижается расход энергии на движение.

Максимальный теоретический запас хода электромобилей, создаваемых на базе новых источников тока, можно оценить в 200 км. Для легковых электромобилей такой границей можно считать 160 км, а для грузовых — 140 км. Приняв указанные величины запаса хода в качестве граничных значений, изменение запаса хода электромобилей можно описать уравнением кривой Б. Гомперца.

Для легковых электромобилей прогнозируемый запас хода

$$L = 160^{-0,624e^{-0,1167}},$$

в основном обусловлено применением на них источников тока различных типов и энергоемкости, а также неидентичными условиями испытаний электромобилей.

Представляет интерес анализ средней величины запаса хода электромобилей различных лет выпуска. Эту зависимость иллюстрируют графики, приведенные на рис. 1.11, 1.12, 1.13 для грубовых и легковых электромобилей, а также для электробусов соответственно. При построении графиков электромобили были объединены

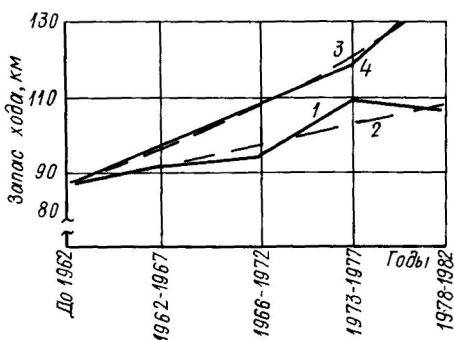


Рис. 1.12. Изменение средней величины запаса хода опытных образцов легковых электромобилей:

1 — средний запас хода аккумуляторных электромобилей; 2 — аппроксимация линейной функцией; 3 — запас хода легковых электромобилей с различными ХИТ; 4 — аппроксимация параболической функцией

для грузовых электромо-
билей

$$L = 140^{-0,677e^{-0,151T}},$$

где e — основание натураль-
ного логарифма.

Согласно полученным за-
висимостям можно ожидать,
что легковые электромубили,
созданные в 1990—1995 гг.,
будут иметь в среднем запас
хода около 115 км.

Средний запас хода гру-
зовых электромубилей (со-
гласно полученным выраже-
ниям) составит 94—102 км.

Для электробусов эта величина может достичь 120 км.

Прогноз средней величины запаса хода не позволяет судить о возможном количестве электромубилей с тем или иным запасом хода. В связи с этим, чтобы прогнозировать структуру производимых электромубилей по запасу хода, целесообразно воспользоваться методом Нормекс. Расчеты (согласно этому методу) выполняются в следующей последовательности: строятся гистограммы распределения частот опытных образцов электромубилей, созданных в различные периоды времени.

Для каждой из указанных гистограмм на бумаге с логарифмической вероятностной сеткой строятся графики накопленных частот (рис. 1.14 и 1.15) и по ним оцениваются средняя и стан-

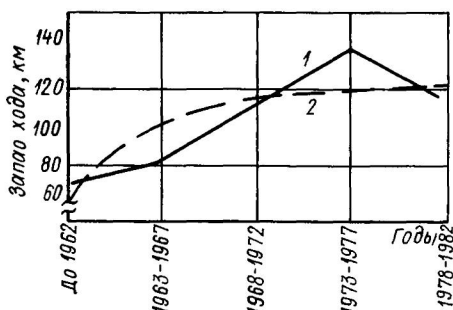


Рис. 1.13. Изменение средней величины запаса хода электробусов:

1 — средний запас хода; 2 — аппроксимация гиперболической функцией

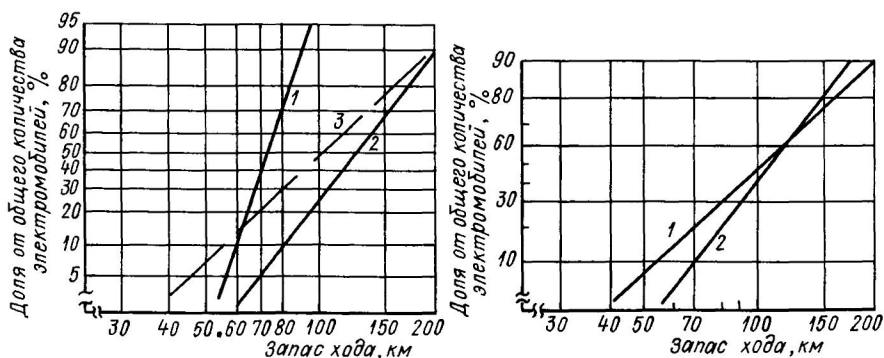


Рис. 1.14. Графикв накопленных частот распределения легковых электромубилей производства

1 — до 1962 года; 2 — с 1963 по 1967 гг.; 3 — с 1968 по 1972 гг.

Рис. 1.15. Графики накопленных частот распределения легковых электромубилей, произведенных с 1973 по 1982 гг.:

1 — производство с 1973 по 1977 гг.; 2 — то же с 1978 по 1982 гг.

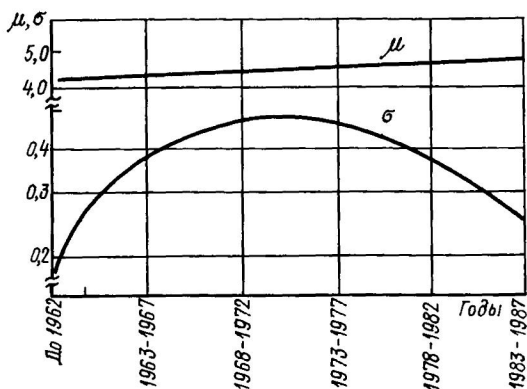


Рис. 1.16. Прогноз средней и стандартного отклонения

где μ — средняя величина логарифмически нормального распределения; σ — стандартное отклонение логарифмически нормального распределения; $X_{0,5}$ и $X_{0,84}$ — значения переменной при уровне накопленных частот 50 и 84 %.

Найденные значения средней величины и стандартного отклонения нанесены на график (рис. 1.16) и экстраполируются на будущие периоды времени.

На основании прогнозных значений μ и σ строятся графики распределения электромобилей согласно запасу хода. Для этих целей может быть использовано выражение

$$Y = \frac{\Delta X}{X_i \sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln X_i - \mu)^2}{2\sigma^2}},$$

где ΔX — интеграл группировки электромобилей согласно запасу хода, км; X_i — среднее значение в этом интервале.

Величина $\Phi_0(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln X_i - \mu)^2}{2\sigma^2}}$ обычно определяется из справочника по вероятностным расчетам.

Графики распределения частот производства электромобилей с различными величинами запаса хода в период с 1990 по 1995 гг. приведены на рис. 1.17.

Из графиков (рис. 1.17) следует, что наиболее вероятно ожидать в 1990—1995 гг. появления легковых электромобилей с запасом хода от 60 до 100 км и грузовых — от 60 до 140 км. При этом примерно для 80 % грузовых электромобилей запас хода может составить 80—120 км, а для легковых — 80—140 км.

Работы по увеличению эксплуатационного пробега электромобилей ведутся во всем мире широким фронтом. При этом можно

дартное отклонение нормального распределения. Это можно сделать графически, измеряя положения точек на подобранной прямой графика распределения накопленных частот, соответствующие значениям 0,5 и 0,84 по шкале накопленных частот. При этом средняя и стандартное отклонение рассчитываются по формулам:

$$\mu = \ln X_{0,5};$$

$$\sigma = \ln \frac{X_{0,84}}{X_{0,5}},$$

условно выделить две группы мероприятий, направленных на увеличение запаса хода электромобилей, — технические и организационные. К числу технических мероприятий следует отнести: совершенствование существующих аккумуляторных батарей; создание новых, более энергоемких источников тока; совершенствование конструкции электромобилей. В числе организационных мероприятий могут быть названы — промежуточная подзарядка аккумуляторов электромобилей и внутрисменная замена аккумуляторных батарей.

Определяющим направлением увеличения запаса хода электромобилей является повышение удельной энергоемкости источников тока. Это направление подробно рассматривается в гл. 2.

Эксплуатационный пробег электромобилей, может быть увеличен и организационно-техническими мероприятиями, к которым относятся замена батарей на специальных станциях и промежуточная подзарядка их при выполнении погрузочно-разгрузочных работ, а также во время перерыва водителя. Замена аккумуляторных батарей — наиболее капиталоемкий вариант, он требует создания специальных станций и наличия дополнительных батарей. Система таких станций разработана и опробована американской фирмой «Электромощн» (*Electromotion*) в районе Бостона.

Западно-германская фирма МАН предусмотрела для созданного ею электробуса замену батарей на конечных пунктах движения. Для этого батареи смонтированы в специальном прицепе, буксируемом электробусом. Операция смены прицепа занимает 7—10 мин максимум.

Перспективным мероприятием является подзарядка батарей грузовых электромобилей во время работы на линии.

Параллельно с указанными направлениями ведутся исследования и разработки в области совершенствования конструкции электромобилей, что способствует снижению потерь энергии в электроприводе и трансмиссии электромобиля, а также затрат на его передвижение. Сущность этих работ рассмотрена в гл. 3.

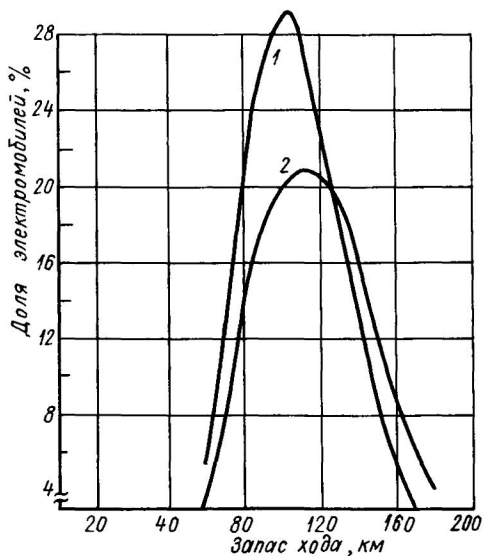


Рис. 1.17. Прогноз распределения опытных образцов электромобилей по запасу хода на 1990—1995 гг.:

1 — грузовые; 2 — легковые

Глава 2. ХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

2.1. ПРИНЦИП РАБОТЫ И ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ БАТАРЕЯМ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Свинцовые батареи до 60-х годов нашего столетия оставались единственным источником энергии для того сравнительно небольшого количества электромобилей (в Англии, ФРГ), которым удалось выжить в конкуренции с автомобилями.

Поскольку свинцовые батареи несмотря на улучшенные более чем в два раза энергетические показатели не удовлетворяли требованиям массового электромобиля, конкурентоспособного с автомобилем, были предприняты беспрецедентные по масштабам усилия по созданию новых химических источников тока с высокими энергетическими, экономическими и экологическими показателями. Решение этой проблемы имело два направления: первое — приспособить какой-либо вариант топливного элемента, работы над которым достигли в это время максимальной интенсивности, и второе — создать электрический аккумулятор на одной из новых электрохимических систем с энергетическими показателями, соизмеримыми с показателями для карбюраторного двигателя [52]. Были поставлены широкие исследования по натриево-серным аккумуляторам с использованием униполярной мембраны, по литий-алюминиево-железосульфидным аккумуляторам с расплавленным электролитом и по металл-кислородным аккумуляторам [6]. Сейчас, т. е. в середине 80-х годов, очевидно, что поставленные задачи не были решены.

В технологичности топливных элементов и новых электрических аккумуляторов возникли сложные проблемы, для решения которых уровни фундаментальных знаний и технологической оснащенности оказались недостаточными. В связи с этим наметилась тенденция хотя бы частичного решения проблемы путем улучшения энергетических и эксплуатационных характеристик промышленных батарей при их использовании в электромобиле. Интерес исследователей и разработчиков вновь привлекли железоникелевые и свинцово-кислотные аккумуляторы. В этом направлении успехи, основанные на лучшем понимании фундаментальных механизмов работы электрохимических систем, оказались более существенными.

Разработка металлокерамического железного электрода, возможность тонкого управления зарядом батареи, использование легких и прочных пластмасс для корпуса и сепаратора наряду с организацией эффективного теплоотвода от батареи — весь этот комплекс мероприятий существенно поднял шансы железоникелевых аккумуляторов для энергоснабжения электромобиля [41].

Значительным усовершенствованиям подвергся свинцово-кислотный аккумулятор (бессурьмяные сплавы для решеток, добавка

в электролит фосфорной кислоты, применение новых расширителей и т. д.) [13, 52]. Все это позволило использовать свинцово-кислотный аккумулятор на начальных стадиях разработки современного электромобиля. Определенные перспективы открываются с изобретением никель-водородного аккумулятора. Последний по своим ресурсным показателям примерно соответствует железоникелевому аккумулятору и в 1,5 раза превосходит его по удельной энергии. Однако использование никель-водородного аккумулятора требует решения целого комплекса вопросов, связанных со снижением стоимости, обеспечением безопасности и др.

Сейчас ни одна из систем (кроме, пожалуй, топливного элемента) не получила окончательного «вотума недоверия» для применения на электромобиле, и попытки создать коммерческую батарею сменились детальными исследованиями более долгосрочного плана.

Предварительно рассмотрим принцип работы электрохимического аккумулятора. При заряде аккумулятор преобразует электрическую энергию в химическую, запасенную в активных массах аккумуляторных электродов. При разряде химическая энергия вновь трансформируется в потребляемую электрическую энергию. Уравнение, передающее эффективность преобразования химической энергии в электрическую, называемое уравнением Гиббса—Геймгольца, имеет вид

$$\Delta H = -E + T \left(\frac{dE}{dT} \right)_p. \quad (2.1)$$

Здесь ΔH — тепловой эффект реакции активных масс; E — ЭДС аккумулятора; $T \left(\frac{dE}{dT} \right)_p$ — величина энтропийных необратимых потерь, которые не могут быть превращены в электрическую работу.

В уравнении (2.1) все величины отнесены к одному кулону. Это дает возможность составляющие уравнения (2.1) выразить в вольтах. При заряде величину

$$A_{\text{п}} = \int_0^{\tau_3} \Delta H I_3 d\tau,$$

где I_3 — ток заряда, τ_3 — время заряда, можно назвать полезной работой, необходимой для перевода подводимой электрической энергии в химическую энергию активных масс. В этом случае КПД заряда запишется в виде

$$\eta_3 = \frac{A_{\text{п}}}{A} = \frac{\int_0^{\tau_3} \Delta H I_3 d\tau}{\int_0^{\tau_3} U_3 I_3 d\tau} = \frac{\Delta H}{\bar{U}_3}, \quad (2.2)$$

где \bar{U}_3 — среднееинтегральное значение зарядного напряжения. Из уравнений (2.1) и (2.2) следует что

$$\eta_3 = \left(1 - \frac{\tilde{E}_{п.з}}{\bar{U}_3}\right) \frac{\Delta H}{E} = \eta_{к.з} \eta_{т.з}. \quad (2.3)$$

В формуле (2.3) $\eta_{к.з}$ — КПД кинетических потерь, обусловленных прохождением электрического тока; $\eta_{т.з}$ — КПД термодинамических потерь; $\tilde{E}_{п.з}$ — сумма кинетических потерь, определяемых сопротивлением прохождению электрического тока при заряде. Эти потери имеют омическую и поляризационную природу. Омические потери вызываются прохождением тока через ионные и металлические проводники. Поляризационные потери обусловлены какой-либо стадией (или несколькими сразу), сопровождающей электрохимическую реакцию на электроде.

Если на электроде аккумулятора при заряде протекает побочная реакция, интенсивность которой определяется выражением $(1 - \Theta) I$, где Θ — выход по току основной реакции, то это приводит к дополнительным кинетическим потерям. Коэффициент полезного действия процесса с учетом этого обстоятельства определяется выражением

$$\eta_{\Theta 3} = \frac{\Delta H \int_0^{\tau_3} \Theta I d\tau}{\int_0^{\tau_3} [\Theta I \Delta H + (1 - \Theta) I \Delta H_1] d\tau} = 1 - \frac{\Delta H_1 \int_0^{\tau_3} (1 - \Theta) I d\tau}{\Delta H \int_0^{\tau_3} I d\tau}, \quad (2.4)$$

где ΔH_1 — энтальпия побочной реакции.

Как правило, побочные реакции протекают при значениях энтальпий основного и побочного процессов, близких друг другу, т. е. $\Delta H \approx \Delta H_1$.

С учетом этого обстоятельства из выражения (2.4) имеем

$$\eta_{\Theta 3} = \frac{\Theta I d\tau}{\int_0^{\tau_3} I d\tau} = \Theta, \quad (2.5)$$

т. е., что токовый КПД равен среднееинтегральному значению выхода по току. Из уравнений (2.3) и (2.5) КПД при заряде аккумулятора определяется выражением

$$\eta_3 = \eta_{к.з} \eta_{т.з} \eta_{\Theta 3} = \left(1 - \frac{E_{п.з}}{\bar{U}_3}\right) \frac{\Delta H}{E}. \quad (2.6)$$

При разряде полезная энергия, равная величине $A'_n = \int_0^{\tau_p} U_p I_p d\tau$, отдается потребителю, а общая энергия определяется выражением

$$A' = \Delta H \int_0^{\tau_p} I_p d\tau.$$

Коэффициент полезного действия разряда находится по формуле

$$\eta_p = \frac{A'_n}{A'} = \frac{\int_0^{\tau_p} U_p I_p d\tau}{\Delta H_0 \int_0^{\tau_p} I_p d\tau} = \frac{\bar{U}_p}{\Delta H}, \quad (2.7)$$

где \bar{U}_p — среднеинтегральное разрядное напряжение.

Если при разряде имеет место побочная реакция на электроде, например выделение водорода при разряде цинкового электрода или кислорода при разряде окисно-никелевого электрода, то общий КПД определяется выражением

$$\eta_p = \eta'_p \bar{\Theta}_p = \frac{\bar{U}_p}{\Delta H} \bar{\Theta}_p. \quad (2.8)$$

Здесь $\bar{\Theta}_p$ — среднеинтегральный выход по току основного процесса при разряде.

Учитывая, что $\bar{U}_p = E - \bar{E}_{np}$, выражение (2.8) можно записать в виде

$$\eta_p = \frac{E - \bar{E}_{np}}{\Delta H} \bar{\Theta}_p = \frac{E}{\Delta H} \left(1 - \frac{E_{np}}{E}\right) \bar{\Theta}_p = \eta_{т.р} \eta_{к.р} \eta_{\Theta p}. \quad (2.9)$$

Общий КПД в цикле заряда—разряда с учетом выражений (2.2), (2.4), (2.7) и (2.8) составит

$$\eta = \eta_3 \eta_p = \frac{\Delta H \bar{\Theta}_3}{\bar{U}_3} \frac{\bar{U}_p}{\Delta H} \bar{\Theta}_p = \frac{\bar{U}_p}{\bar{U}_3} \bar{\Theta}_3 \bar{\Theta}_p.$$

Значения ΔH и E , т. е. термодинамические параметры электрохимической системы, являются для аккумулятора конкретного типа величинами постоянными. В связи с этим увеличить η можно, уменьшая кинетические потери и увеличивая коэффициент использования активных масс в циклах заряда—разряда.

Кинетические потери (т. е. величину E_n) можно уменьшить с помощью ряда конструктивных и технологических мероприятий. К ним относится прежде всего применение пористых электродов.

тродов, представляющих собой жесткую электропроводящую структуру с развитой системой связанных пор заданных размеров. Применение пористого электрода позволяет реализовать электрохимическую реакцию не на фронтальной поверхности, как в случае использования гладкого электрода, а в объеме электрода, что приводит к существенно меньшим кинетическим потерям. Если истинная поверхность в единице объема пористого электрода равна S (удельная поверхность), то при толщине электрода δ увеличение поверхности пористого электрода в сравнении с поверхностью гладкого электрода, равной геометрической площади, составит величину δS . Поскольку пористый электрод имеет удельную поверхность порядка 10^3 — 10^5 см²/см³, то при рационально принятой толщине аккумуляторного электрода $\delta = 10^{-1}$ см поверхность пористого электрода в сравнении с гладким увеличится в 10^2 — 10^4 раз. Как правило, из-за транспортного и омического сопротивлений пористый электрод загружается неравномерно и габаритная плотность тока на электроде меньше максимально возможной. Применение пористого электрода снижает поляризационные потери. Для уменьшения омического сопротивления применяют сепараторы с высокой эффективной электропроводностью, электролит оптимального количества и состава, низкоомные токоподводы. Кроме того, на величину коэффициента использования η_0 можно влиять, совершенствуя схемы эксплуатации батарей.

Сформулируем требования к тяговым батареям для электромотоцикла. В качестве базового выберем ездовой цикл «С» (см. стр. 139).

Требование на удельную энергию батареи определяется из балансного соотношения

$$\omega_B G_B = KGL, \quad (2.10)$$

где K — расход энергии, отнесенный к 1 км·кг, определяется экспериментально или расчетно для цикла «С», L — запас хода.

Выразим массу электромотоцикла через относительную массу батареи:

$$\alpha = G_B/G \text{ и } G = G_B/\alpha. \quad (2.11)$$

Тогда из выражений (2.10) и (2.11) следует, что $\omega_B = KL/\alpha$.

Таким образом, требуемая удельная энергия зависит от удельного расхода энергии на 1 кг·км и относительной массы, т. е. от параметров, определяемых конструкцией электромотоцикла, а также от длины пути.

Учитывая, что K находится в пределах 0,12—0,15 Вт·ч/(кг·км), а $\alpha = 0,25$, можно получить верхний и нижний пределы соотношения между энергией батареи и запасом хода электромотоцикла:

$$\left. \begin{aligned} L_{\min} &= 0,25/0,15\omega_B = 1,66\omega_B; \\ L_{\max} &= 0,25/0,12\omega_B = 2\omega_B. \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

Первое соотношение больше соответствует экспериментальным данным, приведенным в работе [8], что подтверждается графиком на рис. 2.1. Второе соотношение отвечает известному правилу, что пробег электромотобиля приближенно равен удвоенной удельной энергии.

Суммарная мощность, которая должна отбираться от аккумуляторной батареи, как известно, затрачивается на ускорение электромотобиля P_k , преодоление сил сопротивления качению P_T , на преодоление аэродинамического сопротивления и на затраты мощности по преодолению подъема, т. е.

$$P_d = \pm P_k + P_T \pm P_a \pm P_n. \quad (2.13)$$

Это выражение определяет максимальную мощность, потребную для обеспечения механического движения. С другой стороны, от батареи требуется дополнительная мощность, связанная с потерями энергии на преобразование электрической энергии в механическую, а также с потерями части механической энергии при передаче ее на колеса. Таким образом, полная мощность, которую должна обеспечивать батарея, определяется выражением

$$P_a = P_d / (\eta_m \eta_a) + P_{всп}.$$

При движении по циклу «С» имеем: $\eta_a = 0,7$, $\eta_m = 0,95$. По поводу величины $P_{всп}$ имеются разные данные. Значение $P_{всп}$ оценивается в 250 Вт без использования кондиционера и в 3 кВт — с кондиционером.

При массовой доле батарей $\alpha = 0,25$, как показывают расчеты в работе [39], значение пиковой мощности составляет 70—80 Вт/кг для внутригородского электромотобиля. Стационарная мощность, т. е. мощность при движении с постоянной скоростью, составляет при движении городского электромотобиля 35—40 Вт/кг и равна приближенно половине пиковой мощности. Соотношение между удельной энергией и удельной мощностью аккумуляторов разных типов показано на рис. 2.2.

Применительно к тяговой батарее электромотобиля в качестве показателя срока службы необходимо рассматривать не количе-

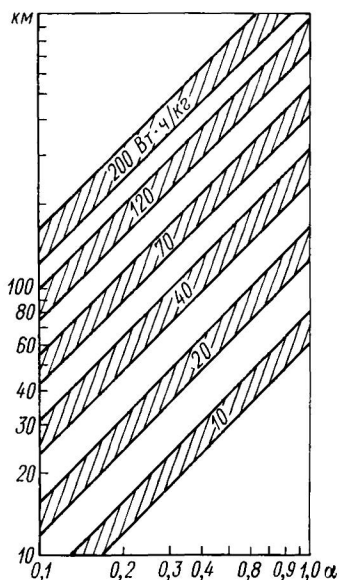


Рис. 2.1. Соотношение между массовой долей батарей и дальностью пробега электромотобиля (цифры на кривых — значение удельной энергии батарей)

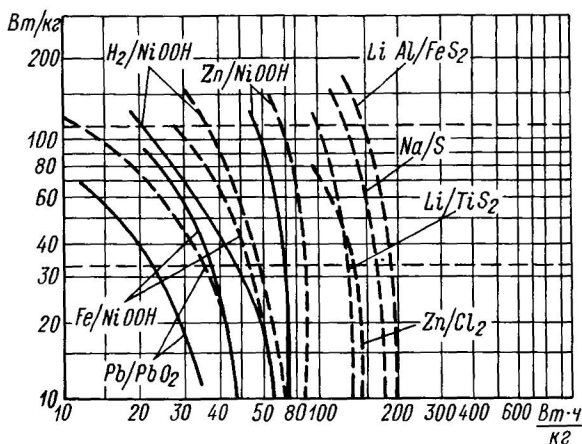


Рис. 2.2. Соотношение между удельной энергией и мощностью аккумуляторов различных электрохимических систем (штриховыми линиями отмечены перспективные показатели)

ство полных циклов, а суммарное количество отданной потребителю энергии, т. е. величину

$$W_{\Pi} = \sum_{i=1}^n U_i C_i,$$

где U_i — среднее разрядное напряжение; C_i — разрядная емкость на i -м цикле.

Величина W_{Π} учитывает и частичное циклирование батареи, при котором отсутствует полный отбор энергии.

Стоимость батареи должна характеризоваться, с одной стороны, удельной стоимостью для оценки начальных затрат, с другой — стоимостью на единицу полной энергии для оценки реальных затрат, т. е.

$$c_{\text{н}} = S/\omega_{\text{Б}}, \quad c_{\text{с.с}} = S/W_{\Pi},$$

где $c_{\text{н}}$ — начальная стоимость одного Вт·ч; $c_{\text{с.с}}$ — стоимость одного Вт·ч на сроке службы.

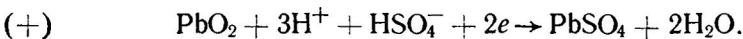
2.2. АНАЛИЗ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТИПОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АККУМУЛЯТОРОВ

Свинцово-кислотные аккумуляторы. Этот тип аккумулятора, созданный свыше 130 лет назад, продолжает доминировать среди промышленных типов благодаря в основном двум преимуществам: низкой стоимости и простой эксплуатации. Основные токообразующие процессы, сопровождающие токообразование в свин-

Изменение плотности кислоты со степенью заряженности

Степень заряженности	Умеренный климат	Тропический климат
100 %-ная заряженность	1,265	1,225
75 % заряженности	1,225	1,185
50 % »	1,190	1,150
25 % »	1,155	1,115
Разряженная	1,120	1,080

щелочно-кислотном аккумуляторе, записываются следующим образом:



Суммарная реакция имеет вид



Таким образом, в результате заряда имеет место выделение, а при разряде — потребление кислоты. Исходная концентрация кислоты составляет 35 %, что соответствует плотности 1,265 г/см³. Изменение концентрации кислоты в процессе заряда—разряда можно использовать как тест на степень заряженности в соответствии с табл. 2.1, заимствованной из работы [25].

При перезаряде аккумулятора на отрицательном электроде выделяется водород, на положительном электроде — кислород. Потенциал свинцового электрода составляет — 0,3 В против стандартного водородного электрода, потенциал двуокисно-свинцового электрода +1,63 В, что соответствует ЭДС аккумулятора $E_0 = 1,93$ В и стандартной свободной энергии $A_{ст} = 371,7$ кДж/моль (161 Вт·ч/кг — теоретическая удельная энергия).

Можно отметить, что фактическая удельная энергия аккумулятора, равная 20—30 Вт·ч/кг, составляет 10—20 % от теоретической; причем это значение было получено в результате длительной эволюции свинцово-кислотного аккумулятора. Особенно интенсивное развитие аккумуляторов этого типа относится к началу нынешнего столетия при использовании его для электрического стартера на автомобилях массового производства. Динамика технологических достижений в области свинцово-кислотных аккумуляторов за период с 1920 по 1960 гг. приведена на рис. 2.3.

Свинцовые аккумуляторы для электротяги выполняются в основном в двух вариантах: панцирными и намазными. Конструкция аккумулятора с панцирными электродами состоит из набора перфорированных пластмассовых панцирей, набитых активной

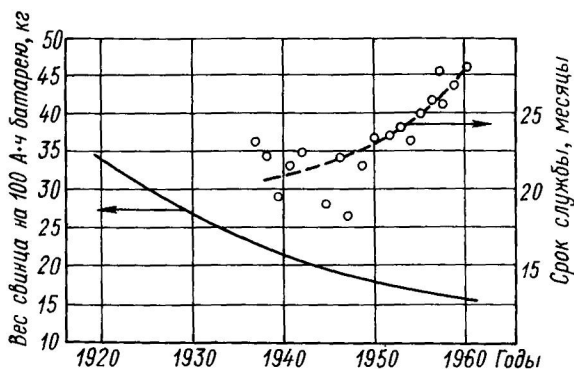


Рис. 2.3. Динамика изменения срока службы и расхода активных масс по годам для свинцово-кислотного аккумулятора

массой. Внутри панциря помещаются свинцовые токоотводы. Для увеличения срока службы панцири с крупной сепарацией, выполняющие функции армирования, содержат панцири с мелкой сепарацией, набитые активной массой. Намазные пластины изготавливают намазкой свинцовой пасты определенного состава (оптимальной является паста состава $4\text{PbO} \cdot \text{PbSO}_4$).

Поскольку срок службы свинцово-кислотных аккумуляторов ограничивается явлением оплывания активной массы положительного электрода, то аккумуляторы с панцирными электродами имеют ресурс существенно больший (1500 циклов), чем аккумуляторы с намазными электродами (500—600 циклов). За рубежом панцирные аккумуляторы получили широкое развитие несмотря на то, что процесс набивки панцирей свинцовым порошком (смесью свинца и оксидов свинца) связан с большой пыленностью и требует введения комплекса строгих экологических мероприятий.

Методы оптимальной эксплуатации свинцово-кислотных аккумуляторов базируются на результатах фундаментальных исследований электрохимических, структурных и технологических параметров электродов и сепарации. В последние годы на мировых рынках появились так называемые безуходные аккумуляторы, не требующие корректировки электролита в процессе срока службы. Это достигается за счет применения малосурьмянистых сплавов, существенно снижающих газыделение на электродах обоих знаков. В комбинации с оптимальными способами заряда в таких аккумуляторах практически не происходит разложения электролита. Небольшие количества газа сбрасываются в атмосферу через страховочный клапан.

Одним из существенных эксплуатационных показателей тяговой батареи является соотношение между временем и током раз-

ряда. Этот показатель для аккумуляторов в области температур от $+20$ до -40 °С подчиняется уравнению Пейкерта

$$\tau = \kappa I^{-n}.$$

При этом коэффициент n убывает с ростом температуры. Данные, базирующиеся на более детальных исследованиях, позволяют записать соотношение между током разряда и емкостью в виде

$$C = \frac{\kappa_0 (1 + \alpha t)}{I^{n-1}},$$

где $n = 1,4$ для электродов обоих знаков; κ_0 равно 0,32 и 0,24 мин; α равно 0,021 и 0,015 мин/°С — для отрицательного и положительного электрода соответственно.

Приведенная формула справедлива в области температур от -18 ° до $+16$ °С и при плотности тока от 21 до 165 мА/см².

При выборе схемы заряда батарей приходится решать задачу эффективного использования зарядного тока в случае ограниченной длительности заряда. В практике эксплуатации свинцовых батарей существует несколько общеупотребительных схем заряда: заряд при постоянном токе (гальваностатический), при постоянном напряжении (потенциостатический) или какой-то вид комбинированного заряда, например гальваностатический до достижения заданной величины напряжения с последующим переходом на потенциостатический заряд, и т. д.

Приняв, что микрокинетика токообразующих процессов в свинцово-кислотных аккумуляторах подчинена тафелевской зависимости, можно решить задачу оптимального заряда аккумулятора. В работе [25] показано, что аккумулятор можно зарядить за минимальное время или на максимальную емкость за заданное время, если регулировать зарядный ток таким образом, чтобы уровень газовыделения на электродах был постоянным.

Соотношение между штрихованной и всей площадью определяет степень использования тока при заряде (рис. 2.4).

Гальваностатический заряд является быстрым, однако его использование требует операции доразряда батареи. Потенциостатический заряд, не требующий доразряда, имеет недостаток, связанный с деградацией выходных характеристик батарей в течение срока службы. Следствием этого

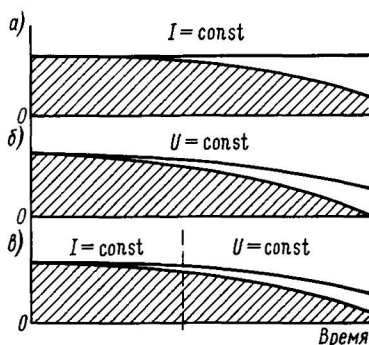


Рис. 2.4. Изменение уровня зарядности (заштрихованная область) и зарядного тока для гальваностатического заряда (а), потенциостатического заряда (б) и комбинированного заряда (в)

является увеличение внутреннего сопротивления и как результат — неполный заряд при фиксированном значении напряжений потенциостатического заряда.

Комбинированный заряд специфичен сложным аппаратным оформлением, которое иногда оправдано, поскольку при комбинированном заряде совмещаются требования скорости и эффективности заряда.

За длительный период развития свинцово-кислотных аккумуляторов не исчерпаны возможности увеличения их удельной энергии и улучшения эксплуатационных показателей. Реализация этих задач возможна при использовании вместо свинцово-сурьмяного сплава в решетке положительного электрода свинцово-кальциевого сплава, замене свинцовой решетки отрицательного электрода металлизированной пластмассой (омедненной или освинцованной), применении четырехосновных паст состава $4\text{PbO} \times \text{PbSO}_4$ и использовании циркулирующего электролита. Смысл отказа от Sb в литейном сплаве, используемом для токоподвода положительного электрода, при всех хороших качествах этой легирующей добавки (лучших физико-механических свойствах сплава Pb—Sb в сравнении с чистым свинцом, лучшими литевными свойствами, хорошей адгезией, меньшим термическим коэффициентом расширения) состоит в предотвращении появления токсичного SbH_3 . Последний появляется при восстановлении Sb, перешедшей на отрицательный электрод при потенциалах, соответствующих концу заряда аккумулятора. В качестве альтернативной добавки к Pb известна добавка 1 % Ca. Добавка Ca вместо Sb, позволяя сохранить хорошие механические и коррозионные свойства сплава Pb—Ca, создает проблемы, связанные с сильным выделением Ca на стадии отливки решетки.

Другая проблема обусловлена ухудшением коэффициента использования активной массы — эффектом, в значительной степени снимаемым добавлением 5—10 % фосфорной кислоты. Снижение веса отрицательного электрода предполагается осуществить за счет использования металлизированной (омедненной или освинцованной) пластмассы в качестве токоподвода отрицательного электрода. Эти работы имеют хорошую перспективу, однако они еще не нашли промышленного применения.

Давая оценку возможности использования свинцовых батарей на автомобиле, необходимо отметить, что их можно рассматривать как промежуточный вариант, с помощью которого на первой стадии промышленного внедрения электромобилей можно содействовать отработке системы энергопитания, специфики конструкции, принципов оптимальной эксплуатации и т. д. Основное преимущество свинцовых батарей — доступность и сравнительная дешевизна.

Конкретные реализации свинцово-кислотных аккумуляторов для электромобиля были предприняты в США фирмами «Юнион

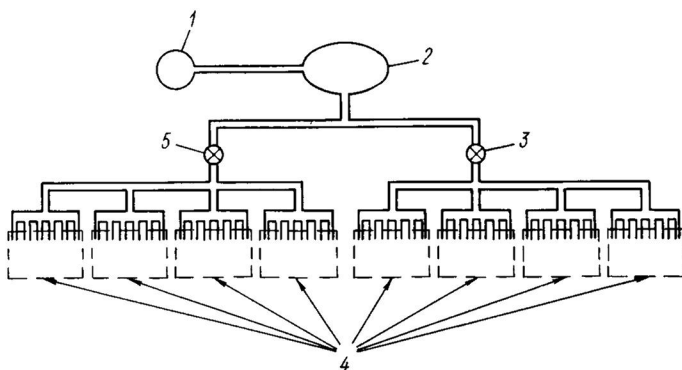


Рис. 2.5. Централизованная система газоотвода, охлаждения и корректировки электролита свинцово-кислотной батареи фирмы «Глоуб»:

1 — воздушный насос; 2 — поглотитель; 3, 5 — клапаны; 4 — батарейные энергомодули на 12 В каждый

Глоуб», ЕСБ, «Эльтра». Результаты разработок этих фирм приведены в табл. 2.2.

Определенные успехи, как следует из табл. 2.2, достигнуты фирмой «Юнион Глоуб», которая использует намазные электроды, решетки на пластмассовой основе и модифицированные расширители типа лигносульфоната. Следует отметить, что относительно большой срок службы аккумуляторов электромобиля фирме удалось достичь за счет централизованной системы газоотвода, охлаждения и корректировки электролита в батарее. Элементы этой системы изображены на рис. 2.5.

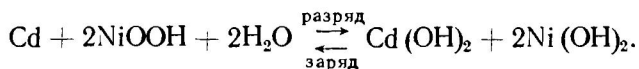
Таблица 2.2

Результаты разработок свинцово-кислотных батарей для электромобиля фирмами «Юнион Глоуб» (*Union Gloube Co*), ЕСБ (*ESB*) и «Эльтра» (*Eltra Corp*).

Лаборатории и фирмы	Удельная энергия при 80 %-ной глубине разряда, Вт·ч/кг	Удельная мощность при 50 %-ной глубине разряда, Вт/кг	Срок службы, циклы	Структура батарей
АНЛ требования	42	105	400	—
«Юнион Глоуб»	41	120	203	Восемь 12-вольтовых модулей емкостью 230 А·ч Девятнадцать 6-вольтовых модулей емкостью 160 А·ч Девятнадцать 6-вольтовых модулей емкостью 180 А·ч
ЕСБ	36	105	116	
«Эльтра»	37	114	125	

Примечание. АНЛ — Аргонская Национальная лаборатория в США является главным куратором работ по электромобилям.

Никель-кадмиевые аккумуляторы. В никель-кадмиевых аккумуляторах (НКА) реализуется следующая токообразующая реакция:



Электродвижущая сила аккумулятора зависит от уровня заряженности и составляет при полной заряженности 1,28 В, а для разряженного НКА имеет значение 1,19 В.

В процессе заряда НКА (до исчерпания разряженной активной массы) не происходит выделение водорода на отрицательном электроде. Этот факт, обусловленный высоким перенапряжением реакции разряда воды на металлическом кадмии, является определяющим для создания полностью герметичного НКА. Негерметичные НКА выпускаются в двух конструктивных исполнениях: ламельном и металлокерамическом.

Положительный электрод ламельной конструкции выполняется аналогично электроду для НЖА. Активная масса отрицательного ламельного электрода НКА состоит из смеси оксида кадмия и используется для повышения коэффициента использования восстановленной искусственной окиси железа. Массовое отношение кадмия к железу составляет для некоторых типов НКА 2,7 : 1, а в основном — 1 : 1. Для стабилизации поверхности электрода в массу добавляют 3,5—4,5 % солярового масла. Никель-кадмиевые аккумуляторы ламельной конструкции при удельной энергии 15—20 Вт·ч/кг имеют срок службы 1000 циклов и не могут быть использованы для рассматриваемых задач ввиду низкого значения удельной мощности, составляющей 5—10 Вт/кг, что совершенно неприемлемо (см. стр. 43). Большого интереса заслуживают НКА с безламельными электродами. Отрицательный электрод может быть пресованного, вальцованного или намазного типа без металлокерамической основы. Однако наиболее распространены конструкции безламельных НКА с металлокерамическими электродами. Отрицательный металлокерамический электрод изготавливается пропиткой пористой никелевой основы солями хлористого и частично азотнокислого кадмия. После процедуры кристаллизации солей в порах следуют операции защелачивания (для перевода солей хлористого и азотнокислого кадмия в гидроксид кадмия), отмывки и сушки. Металлокерамическая основа изготавливается аналогично таковой для окисно-никелевого электрода (ОНЭ) металлокерамической конструкции.

Безламельные НКА негерметичного типа, используемые как стартерные, имеют удельную энергию 20—25 Вт·ч/кг, удельную мощность до 100 Вт/кг и срок службы до 2000 циклов.

С точки зрения удобства эксплуатации целесообразно иметь безуходные батареи, не требующие операций корректировки электролита. Свинцово-кислотный аккумулятор, в принципе, можно сделать безуходным, ввиду того что кислота обратимо

адсорбирует ограниченное количество углекислого газа. При эксплуатации щелочных батарей имеет место накопление карбонатов в электролите и уменьшение концентрации щелочи в соответствии с реакцией



В связи с этим эксплуатация щелочных негерметичных батарей требует корректировки или замены электролита, что делает чрезвычайно актуальной задачу герметизации НКА. Никель-кадмиевая электрохимическая система допускает, как указывалось выше, полную герметизацию.

Принцип герметизации НКА основывается на реализации замкнутого кислородного цикла [40], который состоит в поглощении на отрицательном электроде кислорода, выделяющегося на ОНЭ; при этом предотвращается выделение водорода на кадмиевом электроде.

В герметичных аккумуляторах емкостью свыше 100 А·ч, которые представляют интерес для использования в ТБЭ, применяются электроды металлокерамической конструкции обоих знаков. Кроме металлокерамического исполнения отрицательный электрод герметичного НКА может быть прессованного, вальцованного или намазного типа без металлокерамической основы. Достоинством таких электродов является высокая удельная емкость (до 0,8 А·ч/см³), однако малая скорость поглощения кислорода не позволяет использовать их в аккумуляторах больших номиналов без тщательного контроля состояния каждого аккумулятора.

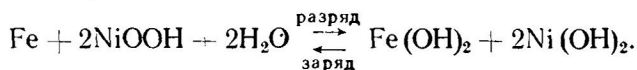
В СССР выпускаются два типа герметичных НКА: аккумулятор типа НКГ-110СА с удельной энергией 27 Вт·ч/кг и 80 Вт·ч/дм³ сроком службы 1000 циклов и аккумулятор типа НКГ-160 с удельной энергией 25 Вт·ч/кг и 65,2 Вт·ч/дм³ со сроком службы 300 циклов.

Реально не существует конструктивных и технологических способов для поднятия удельной энергии НКА выше 30 Вт·ч/кг, сохраняя при этом высокую удельную мощность. Удельная цена НКА в семь-восемь раз выше, чем СКА, при сроке службы, большем только в три раза. Все это не позволяет рассматривать никель-кадмиевую батарею как перспективную в электромобиле массового использования.

Никель-железные аккумуляторы. Никель-железные аккумуляторы (НЖА) являются одними из самых реальных для использования в электромобилях благодаря трем основным преимуществам: доступности исходного сырья, малой стоимости и большому сроку службы.

Основными проблемами при применении НЖА являются: плохое использование тока, сопровождающееся выделением H₂ при заряде; невозможность герметизации и связанная с этим необходимость корректировки электролита.

Суммарная токообразующая реакция в НЖА записывается следующим образом:



В токообразующем процессе участвует вода, что является фактом, не имеющим существенного значения при работе аккумулятора в избытке электролита.

С момента появления до 60-х годов НЖА выполнялись в ламельной конструкции. По этому варианту изготовления активная масса (положительная или отрицательная) запрессовывалась в стальные тонкие перфорированные секции (ламели), которые выполняли армирующую и токоподводящую функции.

Ламели могут быть прямоугольными (аккумулятор Юнгера) или цилиндрической формы (аккумулятор Эдисона). В соответ-

Т а б л и ц а 2.3

Сравнение отечественных и зарубежных НЖА

Аккумулятор	Емкость, А·ч	Удельная энергия	
		Вт·ч/кг	Вт·ч/дм ³
СССР			
ТНЖК-300	300	34,0	61,5
ТНЖК-350	350	33,0	69,5
ТНЖК-400	400	35,0	66,3
ТНЖК-500	500	34,6	64,0
ТНЖК-600	600	32,7	65,5
ТНЖК-700	700	33,0	68,0
«Варта» (ФРГ)			
(+) — трубчатый, (—) — ламельный			
E ₄	300	22,5	51,7
E ₅	375	23,7	54,2
E ₆	450	24,6	56,3
E ₇	525	25,2	56,8
E ₈	600	25,7	58,5
E ₁₀	750	26,5	57,5
E ₁₂	900	26,4	57,5
САФТ (Франция)			
(+) — ламельный, (—) — безламельный			
МРА5	270	28,2	61,1
МРА6	324	28,8	63,7
МРА7	378	29,3	65,7
МРА9	486	29,9	68,6
МРА11	594	30,3	69,2
МРА13	702	30,6	70,8
МРА16	864	30,9	72,0

ствии с этим конструкцию с прямоугольными ламелями в СССР называют аккумулятором с ламельными электродами, а аккумулятор Эдисона — аккумулятором с трубчатым электродом.

В СССР выпускаются аккумуляторы ламельной конструкции электродов обоих знаков. Их удельная энергия приблизительно такая же, как у аккумуляторов с ламельными электродами, которые выпускаются фирмами САФТ (SAFT, Франция) и «Юнгер» (*Junger*, Швеция). В основном западноевропейские фирмы в настоящее время производят тяговые щелочные аккумуляторы с положительным электродом трубчатой конструкции в комбинации с отрицательным или безламельным (спеченным) электродом. Безламельный железный электрод изготовляют путем напрессовки термически восстановленного железного порошка на токоподводящую ленту (температура восстановления 700—850 °С) с последующим спеканием в атмосфере водорода при 700—1050 °С. Исходное сырье для получения железного порошка — окись железа Fe_2O_3 , магнетит Fe_3O_4 или сульфид железа.

Отечественные НЖА с безламельным отрицательным электродом и ламельным положительным электродом находятся на уровне лучших зарубежных образцов [46], что следует из табл. 2.3.

Проблема электромобиля стимулировала рост разработок по НЖА [13]. В СССР аккумуляторным ВНИПКТИ разработан опытный аккумулятор ЭНЖ-200, схематический чертеж которого дан на рис. 2.6. Отрицательный электрод безламельной конструкции изготовлен из высоковосстановленного железного порошка методом пропитки в ваннах. Такой электрод с пористостью 45—50 % обеспечивает получение почти в два раза большей емкости на единицу массы и объема при силе тока $I = 0,2C$ и более чем в три раза — при $I = 1C$.

Полиэтилен использовался и как материал сепаратора, и как материал сосуда. При $I = 0,2C$ удельная энергия составляла 32 Вт·ч/кг, а при $I = 1C$ — 24 Вт·ч/кг. Эксперименты показали, что при работе током $1C$ НЖА разогревается от 28 до 60 °С, поэтому в летнее время необходимо принудительное охлаждение батарей.

В США разработкой НЖА для электромобиля занимаются фирмы «Вестингауз (*Westinghouse Electric Corp.*) и «Игл-Пичер»

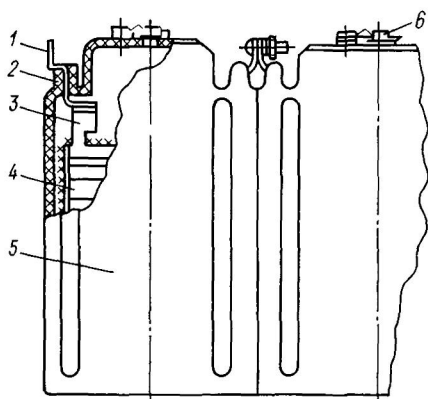


Рис. 2.6. Схематичный чертеж и коммутация аккумуляторов ЭНЖ-200:

1 — шина — борн; 2 — резиновое кольцо; 3 — плата контактная; 4 — электрод; 5 — корпус, 6 — межэлементное соединение

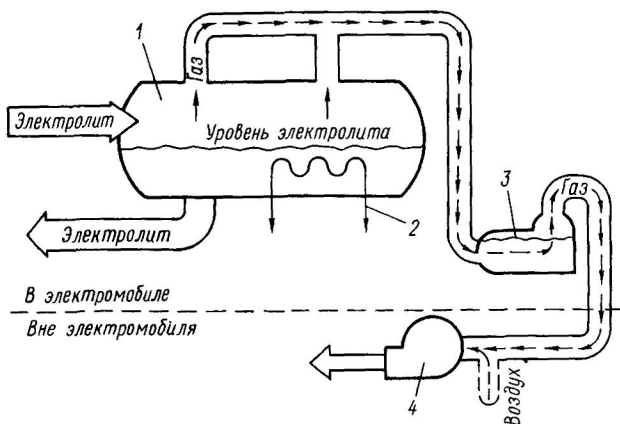


Рис. 2.7. Устройство для принудительной циркуляции электролита никель-железной батареи фирмы «Вестингауз»:

1 — резервуар для электролита; 2 — теплообменник; 3 — барботер; 4 — система разбавления и вентиляции

(Eagle-Picher), работы которых курирует Аргонская Национальная лаборатория — главный координатор проектов по электромобилям.

В аккумуляторах используются безламельный железный ($\delta = 1$ мм) и трубчатый окисно-никелевый ($\delta = 2,5$ мм) электроды, разделенные полипропиленовым сепаратором. Моноблочная конструкция позволяет заметно повысить объемные характеристики за счет исключения воздушных зазоров. Поскольку теплообмен в этом случае затруднен, фирма использует систему принудительной циркуляции электролита. Последняя является превосходным техническим решением, обеспечивающим теплосъем и коррекцию электролита. Схема циркуляционного устройства для НЖА фирмы «Вестингауз» приведена на рис. 2.7 [54]. Батарея содержала 10 штук 6-аккумуляторных и 6 штук 5-аккумуляторных модулей. Параметры батареи следующие:

Число аккумуляторов	90
Общая масса, кг	492
Масса системы циркуляции, кг	17,3
Ток заряда при длительности 4 ч, А	70
Ток разряда, А	73 (до напряжения 100 В)
Емкость, А·ч	190—200
Среднее напряжение, В	113,0
Энергия, кВт·ч	22

Энергия батарей, циклируемой в приведенном режиме, падает с 50 Вт·ч/кг до 45 Вт·ч/кг через 400 циклов.

Фирма «Игл-Пичер» ведет работы по созданию НЖА для электромобилей совместно со шведской фирмой СНДК. Последняя по-

ставляет металлокерамический железный электрод. Этот электрод изготавливается путем напрессовки агломерированного железного порошка на металлический токоотвод с последующим спеканием в восстановительной атмосфере.

Окисно-никелевый электрод (ОНЭ) фирмы «Игл-Пичер» представляет собой безламельный электрод металлокерамической конструкции. Технология изготовления такого электрода состоит из следующих стадий: получение высокопористой (до 80 %) никелевой основы путем прессования никелевого порошка на никелевую или железную никелированную решетку с летучим наполнителем, например карбамидом, и спекание нанесенной массы в водородной атмосфере при $t = 700 \div 900$ °С. Далее следует пропитка полученных основ в растворе азотнокислого никеля, кристаллизация соли в порах электрода, защелачивание для перевода соли азотнокислого никеля в гидроксид никеля (II) с последующей отмывкой от щелочи, сушкой и формированием. Специфика электрохимической пропитки в противоположность обычной химической, применяемой в технологии изготовления ОНЭ фирмы «Игл-Пичер», состоит в пропитке электродов при катодной поляризации основы; последний прием позволяет получать основы более однородно заполненные гидроксидом никеля (II) при меньшей коррозии собственно никелевой основы в условиях пропитки.

Удельная емкость металлокерамических ОНЭ составляет 0,9—1,1 А·ч/г и 0,35—0,45 А·ч/см³.

Фирма «Игл-Пичер» использует моноблочную конструкцию батареи. Каждый модуль включает шесть аккумуляторов. При заряде действует принудительное воздушное охлаждение. Сравнительные испытания НЖА, изготовленных фирмами «Вестингауз» и «Игл-Пичер», проведенных Аргонской Национальной лабораторией, показали практическую идентичность характеристик.

Из серьезных технических достижений в разработке НЖА для электромобиля следует упомянуть (кроме железного электрода фирмы СНДК) ОНЭ металлокерамической конструкции фирмы «Даймлер-Бенц» (*Deimler-Benz*, ФРГ). При новой технологии изготовления ОНЭ осуществляется наполнение вспененного полимерного материала сухим никелевым порошком с размером частиц 2—4 мкм и нагреванием при 450 °С для выплавления полимерной основы с последующим спеканием в атмосфере водорода при $t = 700 \div 1000$ °С. Полученная высокопористая коррозионно-стойкая основа подвергается электрохимической пропитке. Выходные характеристики электрода: 0,1—0,12 А·ч/г и 0,45—0,50 А·ч/см³.

Если рассматривать перспективы развития НЖА для электромобилей, то необходимо отметить следующее. Возможно за счет набора технологических мероприятий довести удельную энергию НЖА до 60 Вт·ч/кг. Стоимость 1 А·ч можно довести до 10—5 коп., однако увеличение плотности энергии усиливает интенсивность тепловыделения. При заряде теплоотвод можно интенсифицировать системой циркуляции электролита, масса которой состав-

Программа разработки НЖА фирмы САФТ

Показатель	1980 г. 200 А.ч	1983 г. 6 В, 230 А.ч		1990 г.
	Результат	Цель	Результат	Цель
Удельная весовая энергия, Вт·ч/кг	50	60	60	70
Удельная объемная энергия, Вт·ч/дм ³	90	110	116	130
Пиковая мощность (15 с, 50 % за- ряженности)	125	150	153	175
Эффективность по энергии, %	55	60	62	65
Срок службы, циклы	1 500	1 500	На испы- таниях	2 000
Эквивалент пробега, км	120 000	120 000	На испы- таниях	160 000

ляет 7 % от массы батарей. Кроме того, необходима разработка режима заряда, обеспечивающего, с одной стороны, приемлемую для практики скорость заряда 6—12 ч, а с другой, — хорошее использование тока. В качестве датчика полной заряженности целесообразно использовать жидкостной сигнальный электрод, реагирующий на поток кислорода, поступающего с положительного электрода [4].

В целом НЖА является единственным промышленным аккумулятором, который на данном этапе можно рассматривать основным кандидатом для применения в электромобилях.

На международной конференции по электромобилям в июне 1984 г. в Париже французской фирмой САФТ была представлена конструкция НЖА, в значительной степени повторяющая конструкцию фирмы «Вестингауз», однако с более высокими энергетическими показателями.

Базовым элементом батарей является 5-аккумуляторный моноблочный модуль емкостью 230 А.ч. Создание энергомодуля явилось этапом реализации программы, приведенной в табл. 2.4.

Окончанием срока службы (табл. 2.4) считался цикл, при котором терялось 20 % начальной емкости. Батарея снабжена системой централизованной доливки водой.

Внешний вид модуля изображен на рис. 2.8. Применен сдвоенный химически пропитанный металлокерамический ОНЭ с габаритными размерами 190×175×2×0,9 мм. Безламельный отрицательный электрод получен прессованием окиси железа с пластмассовым связующим материалом на стальную ленту. Каждый аккумулятор содержит 10 отрицательных электродов с габаритными размерами 19×175×1,5 мм. Массовая раскладка на один аккумулятор приведена в табл. 2.5.

Массовая раскладка НЖА фирмы САФТ

Элементы аккумулятора	Килограммы	%
Положительный электрод	11,30	45,0
Отрицательный электрод	5,95	23,7
Сепаратор	0,65	2,6
Сосуд и уплотнения	1,25	5,0
Токоотводы и межэлементные соединения	0,1	0,4
Общая масса	25,10	100

Зависимость удельной энергии от температуры для различных токов разряда приведена на рис. 2.9, из которого следует, что в режиме электромобиля энергомодуль надежно функционирует при температуре от 0 °С.

При окружающей температуре 25 °С при непрерывном разряде током 1С имеет место разогрев энергомодуля до 60 °С (рис. 2.10). Понятно, что в системе электромобиля это значение температуры существенно повысится, поэтому необходима организация принудительного охлаждения; так как при использовании пластмассовых сосудов конвективная теплоотдача окажется недостаточной, необходимо жидкостное охлаждение по типу, используемому фирмой «Вестингауз».

Эксплуатационные испытания энергомодулей проводились на модели «Пежо 104 И» (Peugeot 104 I) типа фургон.

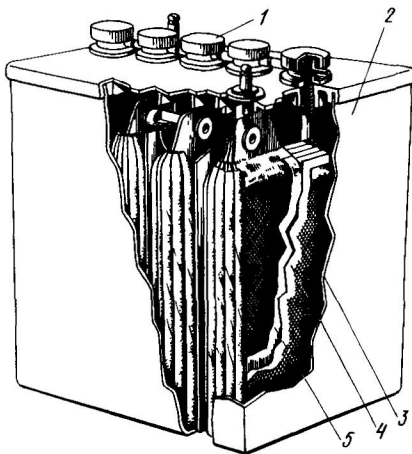


Рис. 2.8. Энергомодуль никель-железной батареи фирмы САФТ:

1 — борны с заливочными отверстиями; 2 — сосуд из термоусадочного полипропилена; 3 — металлокерамический положительный электрод; 4 — спеченный отрицательный электрод; 5 — сепаратор

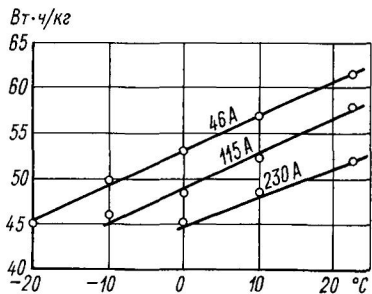


Рис. 2.9. Зависимость удельной энергии от температуры никель-железной батареи фирмы САФТ (цифры на кривых — токи разряда)

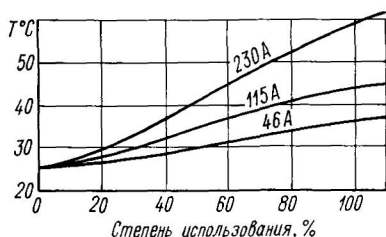


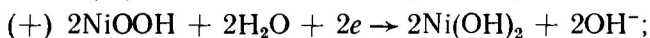
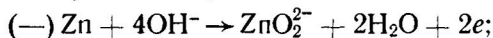
Рис. 2.10. Изменение температуры электролита при разряде энерго модуля токами 46 А, 115 А, 230 А

Электромобиль был снабжен 16 энерго модулями описанного типа. При весе незагруженного электро мобиля 1130 кг масса батареи составила 430 кг. Пробег в условиях городского движения составил 120 км при полном заряде и средней скорости 23 км/ч. Общая энерго емкость батареи — 22,9 кВт·ч, что соответствовало удельной энергии 57 Вт·ч/кг.

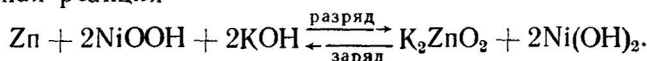
Оценивая данные, представленные фирмой САФТ, необходимо отметить следующее. По существу конструкция энерго модуля повторяет конструкцию фирмы «Вестингауз». Рекламируемый ресурс работы завышен, поскольку приводятся данные по отдельному энерго модулю, а не по батарее в целом. При эксплуатации в электро мобилье необходимо будет решить проблему принудительного жидкостного охлаждения по типу, используемому фирмой «Вестингауз».

Никель-цинковый аккумулятор. Этот тип аккумулятора некоторое время рассматривался как наиболее реальный источник энергоснабжения электро мобиля 70—80-х годов благодаря нескольким благоприятным особенностям: высокой удельной энергии (до 60 Вт·ч/кг), пологому разрядному напряжению, способностью выдерживать пиковые нагрузки. Определенные трудности возникали в связи с сравнительно ограниченным сроком службы таких аккумуляторов (150—250 циклов), однако казалось, что при определенных технологических ухищрениях задача увеличения срока службы никель-цинкового аккумулятора (НЦА) будет решена. Опыт последних 20 лет показал, что реальные пути существенного повышения электрического ресурса НЦА отсутствуют, а жесткий электрический и тепловой режим эксплуатации НЦА в электро мобилье позволяет реально рассчитывать на 100—150 циклов. Тем не менее работы над этой системой продолжают и хотя маловероятно, что удастся довести такой параметр как срок службы до коммерчески приемлемого уровня, никель-цинковую систему следует, как и свинцовую, рассматривать в качестве промежуточной на пути создания массового электро мобиля [23].

Парциальные и суммарная токообразующие реакции для НЦА записываются следующим образом:



суммарная реакция



Условием стабильной работы НЦА является обеспечение такого режима работы цинкового электрода, при котором предельные токи диффузии из приэлектродных слоев заведомо больше токов заряда. Это требование обеспечивается, с одной стороны, применением пористых электродов, с другой — сепаратора, локализирующего электролит в узком приэлектродном пространстве. Наличие цинкатного электролита обязывает применять в НЦА положительный электрод металлокерамической конструкции, поскольку коэффициент использования ОНЭ ламельной конструкции в цинкатных электролитах составляет 40—50 %.

Самой серьезной проблемой при создании НЦА является малый электрический ресурс в условиях электромобиля из-за коротких замыканий и оплывания цинкового электрода. Для увеличения срока службы проводятся работы по усовершенствованию сепаратора: обработка гидратцеллюлозной пленки ионами серебра и других тяжелых материалов; переход на сепараторы, в качестве которых используются ионнообменные мембраны и неорганические сепараторы.

Определяющим для увеличения срока службы НЦА является комплекс мероприятий, направленных на увеличение прочности, сохранение формы и структуры цинкового электрода, что достигается введением в активную массу до 5 % тетрафторэтилена в качестве связующего. Требование несоизмеримости тока заряда и тока диффузии цинката ($I_{зар} < I_{диф}$) обеспечивается двумя вариантами конструкции НЦА. Первый общепринятый вариант состоит в плотной сборке электродного пакета с изоляцией электродов друг от друга несколькими слоями сепарации, затрудняющей протекание транспортных процессов в межэлектродном пространстве. Во втором варианте конструктивного оформления, напротив, создаются условия для конвективного переноса цинкат ионов в межэлектродном пространстве с помощью прокачки электролита или каким-либо другим путем. Предлагается, например, вибрирующий или вращающийся цинковый электрод.

Можно отметить, что при выигрыше по сроку службы во втором конструктивном варианте проигрыш аккумулятору с плотной сборкой по удельной весовой энергии составляет 30 %.

Батарея на базе НЦА разрабатывается по программе АНЛ несколькими фирмами в США: ЕСБ, «Энеджи Ризич Корпорейшен» (E. R. C.), «Гоулд» (Gould).

Не анализируя подробно результатов испытаний, отметим, что никель-цинковые модули имеют удельную энергию около 60 Вт·ч/кг и удельную мощность 130 Вт/кг. Однако максимальный срок службы составляет 120 циклов при 80—100 %-ной глубине разряда, и реальных путей доведения срока службы до 500—800 циклов в настоящее время практически не существует.

В СССР никель-цинковая батарея типа 84НЦ-125-У2, разработанная в аккумуляторном ВНИПКТИ, была использована для энергоснабжения электромобиля типа ВАЗ-21029.

Параметры батарей следующие:

Число аккумуляторов	84
Общая масса, кг	160
Ток заряда, А	20
Ток разряда, А:	
номинальная	60
пиковая	250
Емкость, А·ч	125
Среднее напряжение, В	134
Энергия, кВт·ч	15

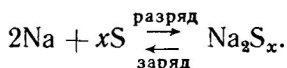
Радиус хода электромобиля до 80 км при скорости 45—50 км/ч. Батарея имела ограниченный срок службы (40—60 циклов) из-за коротких замыканий отдельных аккумуляторов.

Высокотемпературные аккумуляторы. К этому классу относятся аккумуляторы на электрохимических системах натрий—сера, литий—сера, литий—алюминий—сульфид железа, работающие с твердым или расплавленным электролитом при температурах 300—450 °С.

Серно-натриевый аккумулятор. С аккумулятором данного типа связывались наибольшие надежды в разработке источников тока для электромобилей, которые по своим энергетическим и экономическим показателям смогли бы составить конкуренцию двигателю внутреннего сгорания [16].

Серно-натриевый аккумулятор содержит натриевый и серный электроды (рис. 2.11), разделенные твердым сепаратором из β-глинозема.

Токообразующая реакция, протекающая при рабочей температуре 300 °С, выражается уравнением



По мере разряда в соответствии с фазовой диаграммой системы сера — сульфид натрия могут образовываться полисульфиды различного состава от Na_2S_3 до Na_2S_5 , причем потенциал серного электрода относительно натриевого электрода при наличии двух фаз (твердый полисульфид—жидкая сера) остается на уровне 2,07—2,08 В независимо от состава полисульфида.

При разряде натрий окисляется на границе раздела фаз натрий—твердый электролит (сепаратор), а ионы натрия движутся через твердый электролит в катодную полость, заполненную графитовым волокном с развитой поверхностью для обеспечения эффективного токоподвода к жидкой сере. Твердый электролит

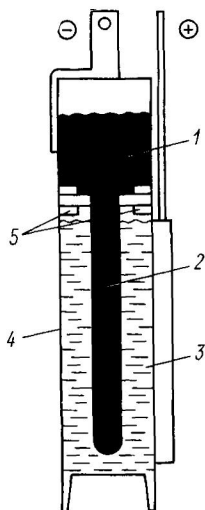


Рис. 2.11. Схематический разрез серно-натриевого аккумулятора:

1 — натрий; 2 — β-глинозем; 3 — сера; 4 — корпус; 5 — уплотнение

состава $\text{Na}_2\text{O} \cdot 11\text{Al}_2\text{O}_3$ содержит гексагональные слои со структурой шпинелей, содержащих атомы алюминия и кислорода. Ионы натрия, расположенные в плоскости, перпендикулярной $C_{\text{осн}}$ кристалла, обладают определенной подвижностью. Значение нонной электропроводности около $0,3 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ для монокристалла β -глинозема при 300°C и в 5—20 раз меньше для поликристаллического образца. Стабилизаторами структуры являются добавки MgO и Li_2O с содержанием по массе 2 %; β -глинозем обладает униполярной проводимостью, причем при совершенной структуре исключается диффузия металлического натрия через твердый электролит.

Работоспособность натриевого электрода определяется процессами, протекающими на границе натриевый электрод — твердый электролит. Внешними проявлениями сложных пограничных эффектов являются нелинейность вольт-амперной характеристики, асимметрия сопротивления в циклах заряд—разряд, возрастание сопротивления аккумулятора при циклировании. Эти эффекты зависят от полноты смачивания натрием керамики, которое значительно улучшается при покрытии электролитной трубки тонкой пленкой свинца. Кроме того, причиной ухудшения смачивания является выход некоторых добавок, например Li и Na_2O , применяемых на стадии изготовления керамики. В связи с этим дозирование этих добавок (наряду с соответствующим покрытием керамики) является эффективным средством стабилизации работы натриевого электрода.

Основная проблема функционирования серного электрода — потеря емкости при циклировании. Если матрица для серного электрода сделана из графитового волокна, то имеет место увеличение сопротивления на границе полисульфида и электролита при заряде; связано это с образованием элементарной серы, экранирующей электролит и препятствующей движению ионов натрия через β -глинозем. Имеются несколько путей решения этой проблемы, один из которых использование графитового войлока переменного сопротивления, увеличивающегося по мере уменьшения расстояния до керамики.

Самой существенной проблемой в натрий-серном аккумуляторе является сохранение униполярной проводимости твердого электролита (сепаратора). Последний изготавливается в форме дисков или труб, причем трубчатой конструкции отдается предпочтение, поскольку только в этом варианте возможно изготовление аккумуляторов больших номиналов. Для аккумулятора емкостью 165 А·ч изготовлен трубчатый сепаратор из β -глинозема диаметром 30 и высотой 450—600 мм.

В настоящее время большинство исследователей сходится на том, что для обеспечения длительного ресурса β -глинозема его исходная структура должна быть мелкозернистой, а причина деградации состоит в расклинивающем воздействии жидкого натрия, проникающего в поры сепаратора.

Наружная камера заполняется серой или смесью ее с полисульфидом натрия; внутренняя полость сепаратора заполняется натрием высокой чистоты, не содержащим щелочных металлов, ионные примеси которых приводят к растрескиванию β -глинозема. Серьезной проблемой является также коррозия стального корпуса, обуславливающая блокирование сульфидами железа и никеля контакта серы с β -глиноземом. В качестве материала, устойчивого в контакте с серой, успешно используются хром и молибден. В некоторых конструкциях аккумуляторов, например в аккумуляторе фирмы «Бритиш Рейл», (*British Rail*), внутренняя полость заполняется серой, а наружная — натрием, что облегчает решение проблемы коррозии корпуса.

Один из уязвимых узлов натрий-серного аккумулятора — уплотнение. В одном из вариантов конструкции сепаратор из β -глинозема заканчивается фланцем, который отделяется от металлического корпуса (катада) кольцами из боросиликатного стекла, окиси алюминия и нитрида бора.

Поскольку серно-натриевый аккумулятор функционирует с потреблением — генерацией тепла, а собственная высокая температура работы требует тепловой изоляции, последнюю необходимо рассматривать с учетом изменения температуры в допустимых пределах. Теплоизоляцию обычно размещают между графитовым цилиндром, служащим токоподводом для серы, и внешней (сталь, молибден) оболочкой. В качестве теплоизоляционного материала обычно используют асбест, хорошо впитывающий расплавленную серу (на случай разгерметизации промежуточного корпуса), или температуростойкий безводный электростатически заряженный гель кремниевой кислоты (эластосил) с удельной поверхностью от 100 до 300 м²/г. Тепловой режим батареи определяется уровнем расходуемой мощности. Так, при мощности 6,5 кВт (стационарная езда) тепловые потери составляют 360 Вт. В этих условиях само-разогрев батареи равен 8 °С за 2 ч.

Срок службы серно-натриевого аккумулятора определяется долговечностью сепаратора. Ресурсоспособность последнего в значительной степени зависит от технологии его изготовления. Сложность приготовления твердого электролита обусловлена тем, что оксид натрия, входящий в его состав, обладает повышенной летучестью при температуре спекания, что усложняет получение совершенной структуры.

При эксплуатации теряется униполярная проводимость электролита, и металл, проникая через сепаратор, попадает в пространство, заполненное серой, что приводит к разогреву и еще более разупорядоченной структуре. В последнее время синтезирован новый твердый электролит, имеющий состав $\text{Na}_{1+x}\text{Zr}_2\text{Si}_x\text{P}_{3-x}\text{O}_{12}$, в котором подвижность иона Na^+ реализуется в трех кристаллографических направлениях при удельном сопротивлении 2—4 Ом·см ($t = 300 \div 350$ °С). Существуют противоречивые данные о сроке службы серно-натриевого аккумулятора. Уверенно мо-

жно говорить о 200 циклах, хотя срок службы отдельных образцов достигает 1500 циклов.

Данные по удельной энергии колеблются в пределах 85—150 Вт·ч/кг при удельной мощности 30—40 Вт/кг.

В качестве альтернативы керамическому сепаратору имеются предложения использовать полые стеклянные капилляры, селективно проводящие ионы натрия. Большое удельное сопротивление стекла (10^4 Ом·см при $t = 300^\circ\text{C}$) компенсируется в какой-то степени существенно меньшей толщиной (10^{-3} см) против толщины керамического сепаратора (10^{-1} см). Металлический натрий находится внутри капилляров, и благодаря их большому количеству (тысячи штук) формируется существенная поверхность раздела, что позволяет работать с малыми плотностями тока (10^{-3} А/см²) при хорошем (до 90 %) использовании активных масс. К настоящему времени на данной конструкции получены образцы с номиналом 40 А·ч со сроком службы 500 циклов.

Несмотря на то, что первый электромобиль — легкий фургон — с источником электроэнергии на основе серно-натриевой батареи был продемонстрирован в 1971 г., информация о работе батарей на базе натрий-серных аккумуляторов практически отсутствует. Основными проблемами при проектировании батарей являются необходимость обеспечения шунтирования аккумулятора с высоким внутренним сопротивлением и отключение с шунтированием аккумулятора с высокими утечками. Поскольку номиналы аккумулятора ограничиваются конструкцией трубчатого сепаратора и достижимы номиналы 150—200 А·ч, для построения электромобильной батареи потребуется значительное число аккумуляторов, соединенных последовательно или параллельно. Это приведет к необходимости использования большого числа силовых исполнительных элементов для отключения и шунтирования дефектных аккумуляторов.

Другой существенной проблемой является обеспечение температуры батареи 300—400 °С при заряде, хранении и разряде, т. е. в условиях неадекватного тепловыделения. В настоящее время это осуществляется путем использования вакуумированной многослойной фольговой теплоизоляции в сочетании с воздушным охлаждением.

Чрезвычайно серьезной является проблема безопасной эксплуатации: в случае утечки через электролит и прямого взаимодействия серы и натрия может произойти полная разгерметизация аккумулятора. Это связано с тем, что температура кипения серы 444 °С, а исходная температура батареи 300—350 °С и реакция взаимодействия серы и натрия сильно экзотермична.

Подытоживая вышеизложенное об аккумуляторе типа натрий—сера, можно отметить, что несмотря на доступные и недорогие исходные материалы (натрий, сера), их постоянную регенерацию (что свойственно жидким реагентам), вопрос о практическом использовании батарей на базе этой системы остается проблема-

тичным. Основными сдерживающими факторами являются малый ресурс сепаратора, дорогостоящие материалы уплотнения и электролита, сложность обеспечения требуемого теплового режима и т. д. Возможно, что натрий-серный аккумулятор, разрабатываемый как стационарный источник для снятия пиковых нагрузок на промышленных электростанциях, первоначально найдет применение именно в этой области. Для стационарного варианта отсутствуют термоудары, связанные с выходом на режим, и возможна тщательная диагностика каждого аккумулятора.

Аккумуляторы литий—алюминий—сульфид железа. Сложность изготовления устойчиво работающего серно-натриевого аккумулятора с твердым электролитом стимулировала работы по использованию расплавленного электролита в качестве альтернативы неводному электролиту. Применение расплавленного электролита позволяет работать с системами, ЭДС которых заведомо больше 1,48 В, т. е. выше напряжения разложения воды. Реализация расплавленного электролита (эвтектической смеси LiCl и KCl) была осуществлена в элементе литий—сера. Осуществлялось гравитационное разделение активных масс за счет меньшей плотности лития в сравнении с серой. Однако такая конструкция оказалась неудачной, поскольку аккумулятор необходимо было строго ориентировать, исключалась многоэлектродная сборка и, кроме того, имелась серьезная проблема диффузии лития и полисульфидов в электролит.

В значительной степени от этих недостатков свободен электрохимический аккумулятор, представляющий собой принципиальное видоизменение литий-серного, т. е. аккумулятор с активными массами на основе литий-алюминиевого сплава (—) и сульфида железа (+). Работа данного аккумулятора протекает в соответствии с электрохимической реакцией:



Электролит — смесь KCl и LiCl. Аккумулятор имеет ЭДС 1,33 В и теоретическую удельную энергию 458 Вт·ч/кг. Отрицательный электрод — интерметаллический сплав лития и алюминия с температурой плавления около 600 °С. В области содержания лития в сплаве 10—45 % электрохимический потенциал сплава (+0,3 В против обратимого литиевого электрода) остается практически постоянным, что позволяет иметь пологую разрядную характеристику электрода. Положительный электрод готовится прессованием на железный токоподвод сульфида железа и графита с добавкой сульфида меди. Сепаратор — нитрид бора (BN) или окись иттрия. Для улучшения смачиваемости в сепараторную матрицу добавляется LiAlCl₄ [15].

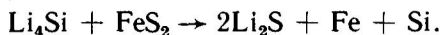
При циклировании аккумулятора емкостью 300 А·ч получено свыше 300 циклов, причем к 300-му циклу удельная энергия по аккумулятору составляла 100 Вт·ч/кг, а падение энергии по отношению к первоначальной составило 40 %.

Основным препятствием для увеличения электрического ресурса аккумулятора являются короткие замыкания вследствие механического прорастания железа при заряде и агломерация литий-алюминиевого сплава.

Модификацией описанного аккумулятора является аккумулятор на базе электрохимической системы



Существенным отличием данного аккумулятора является более высокая удельная энергия (944 Вт·ч/кг). Токообразующая реакция имеет следующий вид:



При разряде образуется ряд промежуточных соединений Li_2Si , $\text{Li}_{21}\text{Si}_8$ и т. д., равновесные потенциалы которых сравнительно мало отличаются друг от друга, обуславливая пологую разрядную характеристику. Разрез аккумулятора дисковой конструкции приведен на рис. 2.12, из которого следует, что несмотря на сравнительно доступные материалы для электродов, материалы для сепаратора, уплотнения и токовывода являются экзотическими.

Достигнутая удельная энергия равна 180 Вт·ч/кг при удельной мощности 7,5 Вт/кг и 120 Вт·ч/кг при удельной мощности 30 Вт/кг, что стимулирует дальнейшие работы по совершенствованию источника этого типа, тем более что достигнутый срок службы составил около 700 циклов.

Заканчивая рассмотрение химических источников тока (ХИТ) с расплавленным электролитом, следует сказать, что технологические барьеры при их освоении в производстве несравненно ниже, чем в случае твердого электролита. Основными проблемами являются удешевление сепарации, организация низкоомного токоподвода к положительному электроду, локализация объемных изменений на положительном электроде.

2.3. О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И КОМБИНИРОВАННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ В ЭЛЕКТРОМОБИЛЯХ

С появлением топливных элементов (ТЭ) были связаны определенные надежды использования их для автономной электротяги. Топливные элементы представляют собой устройства для преоб-

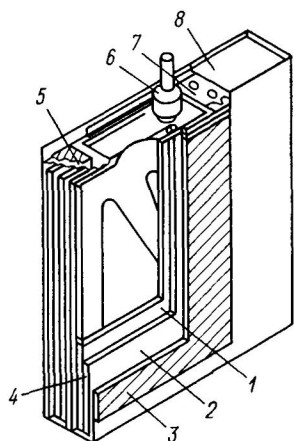


Рис. 2.12. Многоэлектродный литий — алюминий — сульфиджелезный аккумулятор:

- 1 — положительный электрод;
- 2 — сепаратор;
- 3 — отрицательный электрод;
- 4 — изолирующая прокладка;
- 5 — керамическое уплотнение;
- 6 — питатель электролита;
- 7 — стопор;
- 8 — крышка

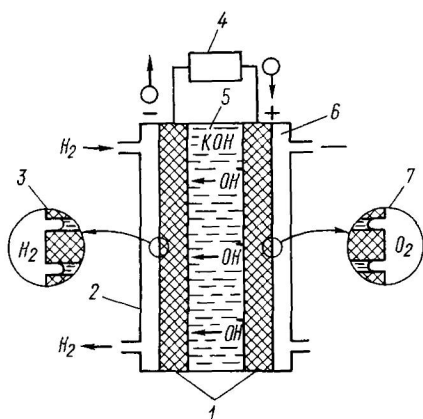


Рис. 2.13. Принципиальная схема топливного элемента:

1 — пористые электроды; 2, 6 — водородная и кислородная газовые камеры; 3, 7 — трехфазные границы раздела в порах водородного и кислородного электродов; 4 — нагрузка; 5 — электролит

разования химической энергии топлива (обычно газообразного) в электрическую энергию.

Существует несколько классификаций ТЭ по виду применяемого топлива, электролита и т. д. Наиболее распространена классификация по рабочей температуре, в соответствии с которой существуют: 1) высоко-

температурные ТЭ с расплавленным карбонатным или твердым электролитом, функционирующие в диапазоне 700—1000 °С; 2) среднетемпературные (200—600 °С), среди которых наиболее известен кислородно-водородный топливный элемент высокого давления конструкции Бэкона; 3) низкотемпературные ТЭ — кислородно-водородные, гидразиновые, метанольные, формальдегидные комбинированные элементы.

Для целей автономной энергетики, сообразуясь с условиями функционирования и степенью разработанности, наиболее подходит кислородно-водородный низкотемпературный ТЭ, схема работы которого изображена на рис. 2.13.

Как правило, ТЭ для регулирования целого набора параметров — давления газа, температуры, интенсивности теплоотвода, концентрации электролита и т. д. снабжается сложной системой автоматики. Последняя (наряду с собственно ТЭ) образует электрохимический генератор.

В начале 70-х годов с ТЭ были связаны попытки построить тяговую батарею для электромобиля. Результатом этих усилий явилось создание двух экспериментальных электромобилей на базе ТЭ. Первый электромобиль был построен компанией «Дженерал Электрик» на базе кислородно-водородного ТЭ и второй — К. Кордешем в компании «Юнион Карбайд» (*Union Carbide*) [58].

В табл. 2.6 приведены основные сравнительные характеристики автомобиля и электромобиля фирмы «Дженерал Электрик».

Эксплуатация электромобиля на ТЭ выявила следующие недостатки:

- 1) большую массу и объем (двукратное превышение против автомобиля);
- 2) короткий срок службы (несколько тысяч часов);
- 3) сложность системы (одногазовая и двухгазовая магистрали);
- 4) проблемы безопасности (высокое напряжение, жидкий водород и кислород);

Сравнительные характеристики автомобиля и электромобиля
фирмы «Дженерал Электрик»

Параметр	Электромобиль	Автомобиль.
Масса, кг	3195	1462
Масса топливного элемента, кг	1521	—
Масса электропривода, кг	247	—
Масса трансмиссии, кг	—	391
Приемистость, с (от 0 до 60 км/ч)	30	
Максимальная скорость, км/ч	112	
Запас хода, км	161—241	350—437

5) высокую стоимость (250 долл. стоит только платина на 1 кВт мощности).

С учетом этих недостатков К. Кордешем был построен электромобиль на базе воздушно-водородного электрохимического генератора и буферной свинцово-кислотной батареи, состоящей из семи последовательно соединенных энергоблоков по 12 В. Основой электрохимического генератора являлись 15 восьмиэлементных модулей, соединенных последовательно (120 элементов). Блок-схема водородно-воздушного электрохимического генератора показана на рис. 2.14.

Параметры свинцовой батареи фирмы «Глоуб»:

Масса, кг	148
Емкость, А·ч	84
Напряжение разомкнутой цепи, В	168

При функционировании топливного элемента в системе с батареей снимается ряд проблем, а именно:

- сокращается до нескольких минут время выхода на режим;
- исключается глубокая поляризация ТЭ, поскольку при снижении напряжения аккумуляторная батарея берет на себя основную нагрузку; при такой малой нагрузке напряжение на ТЭ выше напряжения аккумуляторной батареи и имеет место подзаряд батареи.

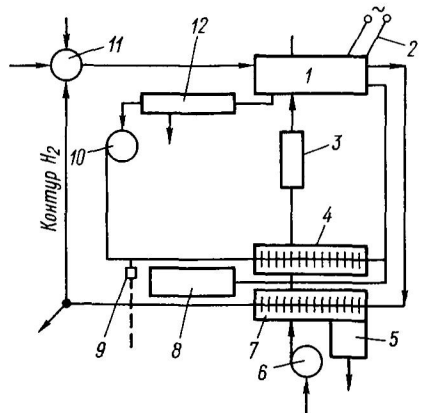


Рис. 2.14. Блок-схема управления топливным элементом мощностью 6 кВт: 1 — батарея топливных элементов; 2 — нагрузка; 3 — фильтр CO_2 ; 4 — теплообменник; 5 — система удаления воды; 6 — воздушный насос; 7 — конденсатор; 8 — блок контроля температуры; 9 — датчик температуры; 10 — электролитный насос; 11 — ввод водорода и азота; 12 — резервуар для электролита

Электромобиль, по данным К. Кордеша [58], к 1975 г. прошел 21 000 км в условиях городского движения, 10 из 15 6-вольтовых энергомодулей функционировали нормально, три энергомодуля — получили механические повреждения.

Выходные данные энергетической установки следующие: электрохимический генератор — выходная мощность — 6 кВт, масса — 166 кг, полная энергия с одной заправки — 38 кВт·ч (удельная энергия 198 Вт·ч/кг), эффективность по энергии 50 %; свинцово-кислотная батарея — мощность — 16 кВт, масса — 148,5 кг, полная энергия — 3,4 кВт·ч (удельная 22,8 Вт·ч/кг).

Этими примерами не исчерпываются попытки создать электрохимический генератор для электротяги.

В СССР [30] разработан водородно-воздушный ТЭ номинальной мощностью 10 кВт, максимальной — 13 кВт, напряжением 42 В с ресурсом 3000 ч для электроснабжения микроэлектробуса РАФ-2210, проходящего дорожные испытания. Пиковые нагрузки парируются никель-цинковой батареей.

В ФРГ фирмой «Сименс» (*Siemens*) для автобуса был построен электрохимический генератор на общую мощность 6 кВт (три последовательных энергомодуля по 2 кВт), заблокированный со свинцовой аккумуляторной батареей. Общая мощность энергоустановки 20 кВт.

Во Французском институте нефти был спроектирован электрохимический генератор водородно-воздушного типа на 10 кВт, аналогичный описанному с той разницей, что водород готовился риформингом метанола. Последнее обстоятельство существенно для эксплуатации, поскольку метанол находится в жидкой фазе. Расчеты, однако, показали, что только при крупномасштабном производстве водорода из метанола, используя стационарные установки, можно получить приемлемую стоимость топлива.

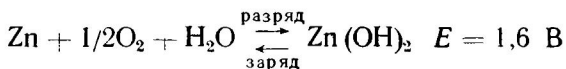
Оценивая возможности использования электрохимических генераторов для силовой батареи электромобиля, можно уверенно сказать, что современный технологический уровень практически не оставляет шансов ТЭ стать массовым источником электроснабжения электромобиля. Главным препятствием является использование драгоценных металлов: платины — на отрицательном электроде; добавки серебра — на положительном. Использование никеля Ренея вместо платины в качестве катализатора маловероятно ввиду необратимой потери активности никелем Ренея при обращении полярности, которой не избежать в многовольтовой батарее топливных элементов.

Если исходить из того, что минимальное удельное содержание платины составляет 10 мг/см², то для обеспечения мощности в 6 кВт при разумном значении плотности тока 0,1 А/см² и напряжении 7,0 В на элемент потребуется 600 г платины, что по экономическим соображениям (при цене 108 руб./г) совершенно неприемлемо.

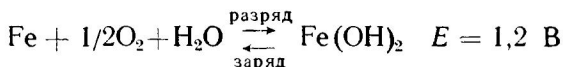
Кроме того, чрезвычайно сложна система обслуживающей автоматики, что допустимо в стационарной, но не в автономной мобильной установке.

Попыткой совместить достоинства ТЭ и классического аккумулятора явилась разработка металл-кислородных систем: цинк, железо, алюминий—кислород, а также аккумуляторов типа цинк—хлор и цинк—бром.

В аккумуляторах цинк—кислород и железо—кислород реализуются следующие токообразующие реакции:



$$W = 1310 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}$$



$$W = 720 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}$$

Конструкция железного и цинкового электродов соответствует используемой в НЖА и НЦА. Конструкция кислородного (воздушного) электрода разрабатывается на базе катода топливного элемента.

Столь простые и энергоемкие системы обладают рядом эксплуатационных трудностей, которые до настоящего времени сдерживают их промышленное освоение. Наиболее существенная трудность — неполная обратимость кислородного электрода.

При заряде выделение кислорода сопровождается необратимыми изменениями в структуре матрицы и катализатора, которые существенно ухудшают мощность электрода в режиме ионизации кислорода. В связи с этими мощностные характеристики аккумулятора ухудшаются при увеличении срока службы. Это негативное явление исследователи пытаются предотвратить с помощью двух альтернативных инженерных решений. Первое состоит в изготовлении кислородного электрода с двумя пространственно разделенными зонами токообразования: в одной зоне имеет место генерация, в другой — ионизация кислорода. Кроме того, предложено использовать аккумуляторы с третьим электродом, который подключается только на заряде в качестве противоиэлектрода цинкового или железного электродов. Этот прием требует дополнительных конструктивных изменений и (что самое существенное) исключает последовательную коммутацию аккумуляторов при заряде для предотвращения выделения кислорода на рабочем кислородном электроде.

Дополнительными проблемами, препятствующими широкому освоению железокислородных аккумуляторов, являются: карбонизация щелочного электролита, генерация водорода на железном электроде (проблема безопасности), низкая мощность кислородного катода. Тем не менее, железокислородная система явля-

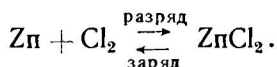
ется чрезвычайно перспективной благодаря сравнительно высокой удельной энергии — 70—80 Вт·ч/кг (при мощности 10—20 Вт/кг) и доступности источников сырья для производства основных компонентов аккумуляторов.

Для цинково-кислородного аккумулятора специфичны более высокое разрядное напряжение (1,5—1,4 В) и удельная энергия (80—110 Вт·ч/кг), а также лучшее использование зарядного тока. Однако возникают дополнительные проблемы, свойственные цинковому электроду — вероятность коротких замыканий как результат дендритообразования при заряде.

Алюминиево-кислородный источник энергии должен рассматриваться как первичный ввиду чрезвычайно плохой обратимости алюминиевого электрода (выход по току при заряде составляет 7—8 %). Главная трудность при создании элемента этого типа состоит в замедлении реакции непосредственного взаимодействия Al с водой. Эту проблему удалось в значительной степени разрешить применением в качестве электролита 2 Н раствора NaCl наряду с добавкой в Al талия, индия или галлия (массовое содержание 0,2 %). Потери на коррозию при разряде составляют 10 %. При относительно доступных основных материалах необходимо решить проблему коррозии при хранении, быстрой смены анодов, регенерации окислов алюминия (на специальных электролизных производствах) и т. д.

Цинк-хлорный и цинк-бромный аккумуляторы. Эти аккумуляторы появились в связи с трудностями, обусловленными использованием кислородного электрода.

В цинк-хлорном аккумуляторе происходит следующая электрохимическая реакция:



Спецификой аккумулятора этого типа является хранение хлора в виде хлоргидрата ($\text{Cl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), который кристаллизуется при температуре +9 °С и представляет собой ярко-желтые ледообразные кристаллы с плотностью 0,5 кг/дм³. В качестве электролита используется 20—30 %-ный водный раствор хлорида цинка.

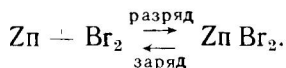
При заряде на цинковом электроде восстанавливается цинк в виде плотного беспористого осадка с выходом по току 99 %. Выделяющийся на противозлектроде хлор растворяется в электролите и удаляется в специальный холодильный бункер, где при температуре ниже 9 °С выпадает хлоргидрат, и хранится до начала разряда. При разряде хлоргидрат закачивается в теплообменник, где происходит дегидратация с выделением хлора в раствор, который подается к хлорному электроду. Ввиду высокой растворимости хлора хлорный электрод работает как жидкостный, с доставкой реагентов по жидкой фазе. Это исключает многие проблемы (необходимость гидрофобизации, сложность от-

вода продуктов), свойственные газовому кислородному электроду. Так как на заряде цинковый электрод работает с принудительной подачей электролита и, следовательно, ионов цинка к электроду, то исключается образование дендритов, а значит, и коротких замыканий. Для устранения разбаланса, приводящего к понижению концентрации цинковых ионов в электролите, рекомендовано периодически подвергать цинковый электрод глубокому разряду.

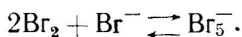
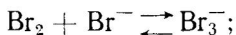
Достигнутая удельная энергия составляет 70 Вт·ч/кг при удельной мощности 70 Вт/кг. Имеются данные о наработке до 1000 циклов с корректировкой состава электролита. Цинк-хлорная система была испытана в 1971 г. на двухместном электромобиле «Вега» (*Vega*). Запас хода составил 260 км при скорости до 105 км/ч. Аномально высокая дальность пробега, не соответствующая удельной энергии, обусловлена искусственно завышенной весовой долей аккумуляторной батареи (47 % от общей массы).

Цинк-бромная электрохимическая система также является комбинированным вариантом, в котором один из электродов (цинк) представляет собой обратимый аккумуляторный электрод, а второй — электрод топливного элемента с жидким реагентом.

Электрохимическая реакция при токообразовании имеет вид:



Цинк в процессе заряда осаждается на графитовую матрицу в виде плотного беспористого осадка так же, как и при работе цинк-хлорного элемента. Ионы брома окисляются до элементарного брома на графитовом противоэлектроде с развитой поверхностью. Элементарный бром в растворе образует трех- и пентабромные комплексы с ионами брома:



При разряде происходит окисление цинка и восстановление брома до бромид-ионов. Если аккумулятор цинк-хлорной системы работает без сепаратора, то в цинк-бромном аккумуляторе вопрос отделения брома от цинкового электрода является ключевым. С этой целью применяются пористые сепараторы, ионообменные мембраны и гелеобразные электролиты. Однако самые изощренные способы разделения позволяют снизить потерю емкости до 50 % за 50 ч хранения. Имеются предложения хранить бром отдельно или в соединении с тетрабутиламмонием в изолированных резервуарах и по мере разряда подавать бром к положительному электроду. Однако этот вариант (как и в случае использования цинк-хлорного аккумулятора) сильно усложняет конструкцию и эксплуатацию в подвижных автономных системах.

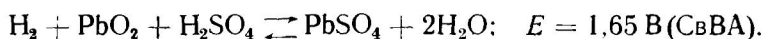
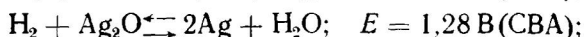
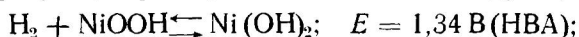
Достигнутая удельная энергия цинк-бромного аккумулятора составляет 60 Вт·ч/кг при удельной мощности 12 Вт/кг. Срок службы ограничен процессами дендритообразования и механического осыпания (при выделении водорода) на цинковом электроде. В связи с этим существует большой разрыв между данными по ресурсу аккумуляторов больших и малых номиналов. Так, для номинала 2,5 А·ч получено 2000 заряд-разрядных циклов, в то время как аккумулятор емкостью 35 А·ч имеет срок службы более 600 циклов.

В настоящее время работы над цинк-хлорным и цинк-бромным аккумуляторами продолжают в направлении использования этих оригинальных систем для выравнивания нагрузки на электрических станциях.

Ввиду необходимости создания довольно сложной системы регулирования, токсичности хлора и брома, необходимости хранить хлор вне реакционной зоны до момента разряда маловероятно, что цинк-хлорные и цинк-бромные аккумуляторы будут применены в электромобиле.

Металло-водородные аккумуляторы. Металло-водородные ХИТ, к которым относится никель-водородный аккумулятор (НВА), серебряно-водородный аккумулятор (СВА) и свинцово-водородный аккумулятор (СвВА), являясь исключительно отечественным изобретением, представляют комбинацию классического аккумулятора и регенеративного топливного элемента; они состоят из водородного и металл-оксидного электродов в растворе щелочи (НВА и СВА) или кислоты (СвВА).

Токообразующие реакции записываются следующим образом:



При заряде на водородном электроде генерируется водород, который накапливается под давлением в герметичном корпусе. Давление при этом связано со степенью заряженности (С) линейным соотношением:

$$C = \beta P,$$

где β — постоянная для заданной конструкции корпуса.

Твердофазный электрод ведет себя так же, как в никель-кадмиевом (в случае НВА), в серебряно-кадмиевом (в случае СВА) или свинцово-кислотном (в случае СвВА) аккумуляторах. При разряде водород потребляется на водородном электроде, и при полной разряженности давление становится равным исходному, соответствующему началу заряда.

Специфичным для металло-водородных аккумуляторов является возможность не отделять водородное топливо от твердофазного окислителя ввиду малой скорости реакции непосредственного

химического взаимодействия водорода с металлоксидными электродами. Это позволяет не принимать специальных мер защиты твердофазного электрода от водорода, что допускает простое конструктивное оформление металло-водородных ХИТ и является источником довольно высокой удельной энергии.

Применительно к задачам создания тяговой батареи электромотоцикла (ТБЭ) интерес представляют только две системы — никель-водородная и свинцово-водородная, поскольку серебряно-водородный аккумулятор из-за ограниченного ресурса (300—500 циклов) и большого расхода серебра (8—10 г/А·ч) не может рассматриваться для комплектации ТБЭ.

Никель-водородный аккумулятор представляет собой комбинацию двух ресурсноспособных электродов — водородного и окисно-никелевого. Имея ресурс до 1000 циклов и удельную энергию до 60 Вт·ч/кг, НВА рассматривается рядом исследователей как потенциальный источник для использования во внутригородском электромотоцикле. Однако реализация этой задачи возможна при решении ряда проблем и, в частности, обеспечения нормального теплового режима, снижения стоимости, гарантирования безопасности при всех эксплуатационных условиях. Требование к теплового режиму обусловлено тем, что НВА обладает повышенным саморазрядом (5—10 % в сутки при 20 °С), сильно зависящим от температуры. Повышенная стоимость НВА обусловлена применением платины в качестве катализатора с расходом 0,6—6 мг/(А·ч) и, главным образом, использованием окисно-никелевого электрода металлокерамической конструкции с удельным расходом никеля 0,6—0,8 г/(А·ч). И, наконец, повышенные требования к безопасности ставятся в связи с высоким рабочим давлением водорода 5—10 МПа [46].

Разработкой НВА для электромотоцикла особенно интенсивно занимаются в ФРГ на фирме «Дойче Автомобильгезельшафт» (*Deutsche Automobilgesellschaft*) [42]. Проведены работы по исследованию теплового режима работы НВА емкостью 85 А·ч, показана возможность применения никеля Ренея вместо платины, предложена новая конструкция окисно-никелевого электрода на основе объемных никелевых сеток толщиной 4,5 мм с удельной энергоемкостью 0,12—0,15 А·ч/г и большим сроком службы. Комплекс этих мероприятий позволил создать экономичный НВА с удельными характеристиками 50 Вт·ч/кг при удельной мощности 30 Вт/кг и сроком службы 800—900 циклов. Разрядные характеристики аккумулятора приведены на рис. 2.15.

Можно отметить, что имеются возможности довести удельную энергию НВА до 60—65 Вт·ч/кг за счет использования более легкого корпуса или снижения коэффициента запаса прочности.

Исследования по СвВА находятся в самой начальной фазе, однако имеется ряд обнадеживающих данных: саморазряд СвВА ниже, чем НВА, расход платины на электрод ввиду существенно большего тока обмена реакции ионизации водорода в кислоте

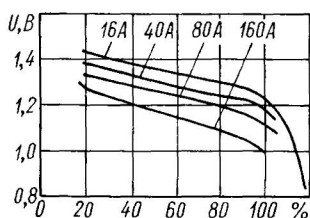


Рис. 2.15. Разрядные характеристики никель-водородного аккумулятора емкостью 85 А·ч (цифры на кривых — токи разряда)

доразряда. В какой степени эти уникальные качества удастся совместить со стоимостью и ограниченной удельной энергией НВА и СвВА, покажет будущее.

2.4. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

В электромобилях аккумуляторные батареи функционируют в чрезвычайно сложных электрических и тепловых условиях. Высокие токи разряда (до 1,5С), импульсный подзаряд при рекуперативном торможении токами до 2С приводят к повышенному тепловыделению, уменьшающему ресурс батареи, а также создают трудности, связанные с защитой отдельных аккумуляторов от переплюсования и перезаряда. Последняя проблема усугубляется тем, что промышленные типы аккумуляторов не имеют достоверного метода контроля уровня заряженности, что создает большие эксплуатационные неудобства.

Рассмотрим вкратце методы тепловой и электрической защиты аккумуляторных батарей.

Тепловой режим и защита батарей. Генерация тепла в аккумуляторных батареях обусловлена поляризационными, омическими и электролитными факторами. Мощность тепловыделения (W_3) в цикле заряда можно определить по формуле

$$W_3 = (1 - \eta_3) U_3 I. \quad (2.14)$$

В соответствии с выражением (2.6) перепишем формулу (2.14) в виде

$$W_3 = I \left(1 - \frac{E_{п.з}}{U_3} \right) \frac{\Delta H}{E} \Theta_3. \quad (2.15)$$

Учитывая, что $E_{п.з} = U_3 - E$, уравнение (2.15) можно записать в виде

$$W_3 = (U_3 - \Delta H \Theta_3) I. \quad (2.16)$$

в сравнении со щелочью также ниже. Однако появляются дополнительные трудности в реализации СвВА, главным образом, связанные с подбором материалов для токоотводов и корпуса, устойчивых к концентрированной серной кислоте.

Можно добавить, что с точки зрения эксплуатации металл-водородные аккумуляторы являются почти идеальной системой. Действительно, НВА и СвВА устойчивы к перезарядам и переплюсованию, допускают контроль степени заряженности, герметичны, не требуют

Для негерметичных водных систем, когда побочные продукты в виде газов выделяются вне аккумулятора, Θ_3 с точки зрения тепловыделения равно единице и мощность тепловыделения определяется выражением

$$W_3 = (U_3 - \Delta H)I. \quad (2.17)$$

Для герметичных аккумуляторов тепловая нагрузка, определяемая выражением (2.16), существенно выше, поскольку имеет место поглощение побочных продуктов внутри аккумулятора с выделением дополнительного тепла, равного $(1 - \Theta)\Delta H$.

При разряде мощность тепловыделения с учетом выражения (2.8) определяется по формуле

$$W_p = (1 - \eta_p)\Delta HI = \left(1 - \frac{\tilde{U}_p}{\Delta H}\bar{\Theta}_p\right)\Delta HI = (\Delta H - \tilde{U}_p\bar{\Theta}_p)I.$$

Как правило, $\tilde{\Theta}_p = 1$ и, следовательно,

$$W_p = (\Delta H - \tilde{U}_p)I.$$

Поле температур для аккумулятора прямоугольной конструкции определяется выражением

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{W_v}{C_p \rho}; \quad (2.18)$$

причем направление координатных осей совпадает с ребрами параллелепипеда.

Для аккумулятора цилиндрической формы аналогичное уравнение имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{W_v}{C_p \rho}, \quad (2.19)$$

где a — коэффициент температуропроводности, причем $a = \lambda / (C_p \rho)$; λ — коэффициент теплопроводности; C_p , ρ — удельная теплоемкость и плотность аккумулятора.

Решение уравнений (2.18) и (2.19) при знании одного начального и двух граничных условий, зависящих от конкретных условий эксплуатации, дает распределение поля температур в виде сходящихся рядов. На практике часто бывает, что передача тепла внутри аккумулятора реализуется существенно быстрее, чем конвективная теплоотдача от стенки аккумуляторного сосуда. Тогда уравнение при отсутствии градиента температур внутри аккумулятора запишется в виде

$$\rho C_p \frac{dT}{d\tau} = \alpha_v (T - T_0) + W_v, \quad (2.20)$$

где T — температура стенки аккумулятора; T_0 — температура окружающей среды.

Интенсификация теплообмена возможна при увеличении коэффициента теплоотдачи α , т. е. за счет создания принудительного обдува батареи встречным потоком воздуха при движении эле-

кромобиля. В этом случае значение коэффициента теплоотдачи возрастает приблизительно на два порядка в сравнении с естественной конвекцией. Интенсивность теплообмена еще более увеличивается, если теплоносителем является жидкость (как это принято в системе охлаждения никель-железных батарей фирмы «Вестингауз»).

Электрические средства управления батареями. Напряженный режим функционирования тяговой батареи электромобиля обязывает применять разнообразный арсенал средств управления и контроля, предотвращающих работу батарей в аномальных режимах перезаряда, переплюсования и перегрева. Эти средства должны быть с одной стороны эффективны, с другой компактны и экономичны.

В этой главе опишем принципиальную сторону вопроса, отвлекаясь от конкретных схемных решений.

Заряд батарей (как было указано ранее) осуществляется в гальваностатическом, потенциостатическом или комбинированном режимах.

Контролируемыми параметрами являются напряжение, ток, емкость, температура. Контроль негерметичных батарей существенно сложнее герметичных конструкций, поскольку для последних при полном заряде характерно увеличение давления и температуры. При гальваностатическом заряде зарядная емкость, пропущенная через батарею, равна $C = It$. Сложность реализации гальваностатического заряда состоит в необходимости информации о степени заряженности к моменту начала заряда. Если эта информация отсутствует, то в некоторых случаях необходимо проводить операцию доразряда с контролем батареи по минимальному напряжению. Это, в первую очередь, относится к никель-цинковой батарее, перезаряд которой приводит к дендритообразованию на цинковом электроде и, следовательно, к коротким замыканиям.

В последнее время в железо-никелевых батареях используется датчик полной заряженности, состоящий из инертного электропроводного сигнального электрода, помещенного через сепаратор вплотную к положительному электроду [23]. Сигнальный электрод через регистрирующее устройство соединяется с отрицательным электродом аккумулятора. При перезаряде НЖА на положительном электроде начинает генерироваться кислород, который, достигнув сигнального электрода, генерирует ток в цепи сигнальный электрод—отрицательный электрод; причем величина тока коррелируется с интенсивностью выделения кислорода. Использование подобного датчика позволяет иметь информацию о моменте окончания заряда, КПД заряда, уровне тепловыделения, а также обходиться без процедуры доразряда батареи.

Потенциостатический заряд, т. е. заряд при постоянном клемном напряжении на батарее, позволяет начинать заряд с любого

уровня заряженности, поскольку наличие емкости в батарее сказывается на ее зарядном напряжении. Для получения лучшего КПД напряжение потенциостатического заряда необходимо задавать термозависимым.

Существенным недостатком потенциостатического заряда является невозможность подобрать клеммное стабилизированное напряжение, гарантирующее полный заряд батареи на протяжении всего срока службы. Это обусловлено трансформацией зарядных характеристик батареи при циклировании.

Контролируемыми параметрами при потенциостатическом заряде являются текущее значение тока и иногда сообщенная емкость, для определения которой в целях необходимо включить интегратор тока, так как при потенциостатическом заряде зарядный ток меняется во времени.

При комбинированном заряде (гальваностатическом до определенного напряжения с последующим переходом на потенциостатический заряд) контролируемыми параметрами являются ток заряда и зарядная емкость, равная величине

$$C = I\tau_1 + \int_{\tau_1}^{\tau_3} I(\tau) d\tau,$$

где τ_1 — время гальваностатического заряда; τ_3 — общее время заряда.

При разряде контролируемыми параметрами являются общее разрядное напряжение и температура. При использовании многоэлементной батареи для уменьшения числа контролируемых ячеек возможно применение группового контроля.

Наряду с общими принципами эксплуатации каждая из промышленных типов аккумуляторных батарей имеет определенные эксплуатационные особенности. Свинцово-кислотные батареи необходимо хранить в заряженном состоянии для избежания сульфатации пластин. По мере понижения уровня электролита его необходимо поддерживать, доливая дистиллированную воду. Если произошла механическая утечка электролита, то только в этом случае необходима корректировка кислотой. Плотность электролита в заряженном состоянии для ТБЭ на базе СКА составляет $1,28 \text{ г/см}^3$. Необходимо отметить, что в случае заниженной плотности электролита батарея отдает меньшую емкость. Превышение плотности (более $1,32 \text{ г/см}^3$) приводит к резкому сокращению срока службы аккумулятора. Если ТБЭ эксплуатировалась не интенсивно, то рекомендуется один раз в месяц давать цикл заряда и один раз в три месяца цикл глубокого разряда и полного заряда. Основными причинами ограничения срока службы являются короткие замыкания и сульфатация. Устранение коротких замыканий возможно в условиях специальных мастерских. Для устранения сульфатации необходимо сменить электролит на дистиллирован-

ную воду и заряжать ТБЭ силой тока, в четыре раза меньшей номинальной.

Перечень требований при эксплуатации ТБЭ на базе никель-железных батарей в общем соответствует таковому на базе кислотных аккумуляторов. Необходимо периодически (не реже одного раза в месяц) осуществлять проведение усиленных зарядов и регулярную доливку воды по мере ее расходования. Специфичным является карбонизация электролита в результате взаимодействия углекислого газа воздуха со щелочью. Для устранения этого явления необходимо не реже одного раза в год проводить смену электролита. Состав электролита для повышенных температур (25—40 °С) — натриевая щелочь $\gamma = 1,20 \text{ г/см}^3$ с добавкой 10—15 г/л LiOH. Для температур от 25 до —20 °С применяется калиевый электролит плотностью $1,25 \text{ г/см}^3$.

Длительно хранить ТБЭ лучше без электролита. Для этого их разряжают, сливают электролит и закрывают пробками.

При эксплуатации железо-никелевой батареи для электромотоцикла необходимо так или иначе идентифицировать момент окончания заряда, поскольку систематические перезаряды приводят к разогревам и потере емкости положительным электродом. Идентификация с помощью уровня напряжения довольно затруднительна, поскольку при этом используются высоковольтные батареи с большим количеством аккумуляторов. Целесообразно использовать упомянутый датчик полной заряженности, реагирующий на интенсивность выделения кислорода.

При эксплуатации никель-цинковых батарей, также применяемых в электромотоцикле, требуется особая аккуратность, поскольку такие явления как перезаряд и перегрев приводят к разрушению пленочной сепарации и к коротким замыканиям. Перед началом заряда батарею рекомендуется разрядить из расчета 1,2 В на аккумулятор. Температура электролита при заряде не должна превышать 40—45 °С. Идентифицировать момент окончания заряда можно по вскипанию или повышению температуры электролита.

Отрицательный электрод никель-цинковой батареи работает в условиях систематических перезарядов. Это связано с ростом токовой доли выделения кислорода на окисно-никелевом электроде по мере увеличения степени заряженности. Вместе с тем истощение концентрации цинкат-ионов в электролите (как упоминалось) приводит к дендритообразованию. Для восстановления концентрации цинкат-ионов рекомендуется проводить глубокий доразряд отрицательного электрода путем поэлементного шунтирования аккумуляторов в батарее. В этом случае растворение цинка происходит без наложения внешнего напряжения за счет более высокого катодного потенциала цинкового электрода в сравнении с водородным с сопряженной реакцией выделения водорода на разряженном окисно-никелевом электроде.

Сравнительные характеристики промышленных и разрабатываемых ХИТ для электромобиля

Система	Удельная энергия, Вт. ч/кг	Удельная мощность, Вт/кг	Срок службы, циклы	Стоимость, руб./(Вт. ч)	Основные проблемы применительно к электромобилю	Состояние обработки
Свинцово-кислотная	22—40	50—100	30—2000	0,02—0,04	Низкая мощность аккумуляторов панцирной конструкции, опливание положительного электрода намазной конструкции, низкая удельная энергия	Промышленный выпуск
Никель-кадмиевая	25—30	50—100	1000—2000	0,2—0,3	Низкая удельная энергия, высокая стоимость	То же
Никель-железная	25—50	50—100	1000—2000	0,04—0,06	Низкая удельная энергия, необходимость корректировки электролита, использование металлокерамического ОНЭ с большим расходом никеля	»
Никель-цинковая	55—65	100—150	100—150	0,1—0,2	Разработка сепаратора, препятствующего проникновению дендритов цинка; большой расход никеля в металлокерамическом ОНЭ; сложность эксплуатации	Полупромышленные партии
Никель-водородная	55—60	100—120	1000—2000	0,15—0,3	Использование платинового катализатора и металлокерамического ОНЭ, обеспечение безопасности в эксплуатации	Опытные партии
Свинцово-водородная	45—50	50—150	300	0,02—0,04	Использование платинового катализатора, разработка коррозионно-стойкого корпуса и материалов токоотводов	Опытные макеты
Цинк—хлоргидрат	150—170	100—120	1000	0,1	Сложная система регулирования, безопасность при эксплуатации	Опытные образцы
Цинк—бромная	66—80	100—120	600—2000	0,1	Большой саморазряд	То же
Натрий—сера	80—150	30—50	250—500	0,1	Малый ресурс сепаратора, коррозия корпуса и токоотводов, дефицитные конструкционные материалы	Полупромышленные партии
Литий—алюминий—сульфид железа	100—130	50—80	300—500	0,1	Прорастание железного электрода и агломерация литий-алюминиевого сплава	Опытные образцы

Приведенный анализ состояния разработки тяговых батарей для электромобиля позволяет сделать определенные выводы.

Проблема оказалась гораздо сложнее, чем предполагалось на начальных этапах разработки. Это подтверждается тем, что пятнадцатилетние усилия по созданию топливных элементов, натрий-серных батарей не завершились промышленным выпуском ХИТ этого типа для электромобиля.

Наиболее обнадеживающие успехи достигнуты в области создания никель-железного аккумулятора; тем не менее потребуются большие усилия для снижения стоимости и организации теплового режима работы батареи, совместимого с большим сроком службы.

Топливные элементы являются слишком сложными, дорогостоящими и малоресурсными системами для массового производства применительно к электромобилю. Определенные перспективы открываются с появлением металло-водородных аккумуляторов. Их применение в электромобиле будет зависеть от разработки экономичного бесплатинового водородного электрода или (если иметь в виду свинцово-водородный аккумулятор) от разработки водородного электрода с содержанием платины 0,05—0,1 мг/см².

Натрий-серный аккумулятор должен пройти еще определенный этап технологической доработки, касающейся увеличения ресурса сепаратора, удешевления конструкционных материалов и рационализации схем эксплуатации.

В табл. 2.7 обобщены показатели рассматриваемых электрических аккумуляторов и приведены данные об основных технологических проблемах, сдерживающих использование аккумуляторов в электромобиле.

3.1. РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Волна повышенного интереса к созданию серийноспособных электромобилей, вызванная энергетическим кризисом 60—70-х годов, совпала по времени с периодом создания и быстрого развития полупроводниковой электроники. Именно в это время появились и начали широко внедряться силовые управляемые вентилятиристоры с относительно малым временем выключения порядка 20—50 мкс, а также мощные кремниевые диоды. Эти новые приборы послужили основой для создания силовых статических преобразователей различных типов и назначения, причем высокая мощность при малых габаритных размерах и высокий КПД таких преобразователей сразу сделали их привлекательными для автономных энергоустановок транспортных средств.

Примерно в это же время начинается бурное развитие полупроводниковой микроэлектроники: вначале в виде транзисторов различных типов, а затем — интегральных микросхем различного уровня интеграции. Достигнутый уровень создания больших интегральных микросхем (БИС), включающих и так называемые микропроцессорные наборы, предоставляет широкие возможности для реализации разнообразных и сложных функций управления в компактных устройствах, обладающих достаточно высокой надежностью и принципиально пригодных для установки на борту транспортных средств типа электромобилей. Бурное развитие полупроводниковой микроэлектроники продолжается и до сих пор; оно имеет далекие перспективы и различные последствия, например сравнительно быстрое старение разработок.

Однако совпадение по времени энергетического кризиса и начала резкого роста полупроводниковой электроники порождает иногда представление о том, что только этот рост определяет возможности создания электромобилей. Этим можно объяснить разработку большого числа опытных образцов электромобилей, в которых новизна технических решений заслоняла технико-экономические показатели эффективности. Часть из таких решений была основана на ошибочных или несвоевременных тенденциях и поэтому они оказались несостоятельными в современных условиях. Например, использование мотор-колесного электропривода для электромобилей малых классов (несмотря на компоновочную привлекательность и улучшенные характеристики движения) обеспечивает гораздо худшие технико-экономические показатели электромобиля, чем ряд вариантов однодвигательного привода. Именно это определяет нецелесообразность использования мотор-колес в электромобилях малых классов.

По указанным причинам возникает серьезная необходимость в функционально-стоимостном анализе вариантов создания электромобилей.

троприводов электромобилей, разумеется, с учетом тенденций развития новых технических средств.

Для электромобилей длительное время применялся почти исключительно тяговый электропривод с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения (ДПВ). Причинами этого послужили некоторые важные достоинства данного типа электродвигателя, а именно:

по естественным реулировочным характеристикам ДПВ в наибольшей мере соответствует требованиям транспортных средств, обеспечивая, в частности, при разгоне максимальный момент при ограниченном токе;

конструктивно ДПВ имеет меньшие, чем другие типы машин постоянного тока, массу и габаритные размеры, так как обмотка возбуждения с малым числом витков провода большого сечения обеспечивает высокое использование объема — коэффициент использования объема по меди достигает значения около 0,8;

ДВП обладает сравнительно высокой коммутационной устойчивостью, так как магнитодвижущая сила обмотки возбуждения изменяется практически одновременно с изменением магнитодвижущей силы реакции якоря, что в правильно спроектированном двигателе заметно компенсирует реактивную ЭДС, стабилизируя искрение на коллекторе; следствием этого является повышенная перегрузочная способность двигателя;

изменение потока возбуждения двигателя при изменении тока **якоря** принципиально способствует повышению КПД ДПВ при работе на естественной характеристике и малых нагрузках;

надежность ДПВ выше, чем других типов двигателей постоянного тока; кроме того, проще защита от аварийных режимов из-за меньшей значимости отказов типа обрыва цепи возбуждения;

для параллельно работающих ДПВ распределение нагрузок оказывается достаточно равномерным без принятия каких-либо специальных мер, вызванных жесткостью естественных механических характеристик.

Дальнейшее изучение методов снижения потерь энергии в двигателе и тяговой системе в целом показало, что более выгодным является применение электродвигателя постоянного тока с независимым регулируемым возбуждением. Наряду с совершенствованием полупроводниковых регуляторов тока, предназначенных для питания независимых обмоток возбуждения, это привело к замене ДПВ электродвигателями со смешанным, а затем и с независимым возбуждением. Кроме снижения потерь энергии при этом достигается ряд функциональных преимуществ: улучшается управляемость электромобиля (особенно в режимах электрического торможения), расширяются пределы регулирования скорости, повышается естественная стабильность установленной скорости, достигается лучшая разгонная динамика. Ряд ведущих электротехнических и автомобильных фирм изготавливает в настоящее время тяговые двигатели с независимым возбуждением. К их

числу относятся: серия А136 фирмы «Бош» (*Bosch*) с регуляторами А45 мощностью от 11 до 30 кВт; двигатель 1тВ фирмы «Сименс» мощностью 16 кВт и др. Двигатели с независимым возбуждением устанавливались на электромобили Х1/23 и Х1/26 фирмы «Фиат», GE/EPDA и «Дельта» фирмы «Дженерал электрик», «Форд Мустанг II» (*Ford Mustang II*) и «Комута» (*Comouta*) фирмы «Форд» (*Ford*), EV2 фирмы «Тойота» (*Toyota*) и ряде других.

Для управления двигателем независимого возбуждения по цепи якоря были разработаны импульсные силовые преобразователи постоянного напряжения, в которых использовались в качестве ключевых элементов тиристоры. Такой силовой преобразователь позволяет обеспечить высококачественное управление тяговым двигателем при небольших потерях энергии в преобразователе и достаточно малой его массе. Подобные преобразователи использовались на электромобилях фирм: «Форд», «Дженерал электрик», «Дженерал моторс» и ряда японских фирм.

Дальнейшее существенное снижение потерь энергии в тяговой системе достигается сочетанием импульсного регулятора напряжения питания якоря и регулятора тока возбуждения. При этом в значительной части диапазона изменения скорости (примерно до 2/3 от всего диапазона) последняя регулируется изменением тока возбуждения: напряжение на якоре максимально, т. е. преобразователь напряжения насыщен и КПД его достигает 0,95—0,97. Этот вариант, называемый иногда квазисериесным управлением, получает в настоящее время все более широкое применение в электромобилях ведущих фирм.

Работы по повышению функциональных и энергетических характеристик тяговых электроприводов постоянного тока рядом фирм ведутся в направлении замены тиристорных силовых преобразователей транзисторными. Такого рода преобразователи применялись на опытных образцах электромобилей фирм: «Фиат», «Рагоно» (*Ragano*), «Дженерал электрик—Крайслер»; КПД таких преобразователей может достигать значения 0,92 и выше во всех используемых режимах работы. Однако высокая стоимость силовых транзисторов на большие токи и недостаточная отработка процессов надежного их использования ограничивают применение транзисторных силовых преобразователей в настоящее время.

Основными недостатками двигателей постоянного тока считаются:

наличие коллекторно-щеточного узла, увеличивающего начальную стоимость двигателя, а также эксплуатационные расходы из-за необходимости его регулярного обслуживания;

более низкие по сравнению с машинами переменного тока показатели объемного и весового использования, обусловленные применением коллекторно-щеточного узла или действием косвенно связанных с коллектором факторов, к которым относятся ограниченность полюсного деления, необходимость добавочных полю-

Основные показатели некоторых типов отечественных
и зарубежных щеток для электродвигателей

Показатель	Тип электрощетки		
	ЭГ-38	ЭГ-61	ЕС 7099
Удельное сопротивление 10^{-6} Ом·м	42—47	24—40	8—14
Переходное сопротивление, В	2,0—2,4	2,2—2,4	1,8—2,1
Коэффициент трения	0,11	0,10	0,10
Износ на стенде, мм/10 тыс. км	0,50	0,70	0,70
Износ на двигателе, мм/10 тыс. км	0,65	0,71	0,74
Эксплуатационный износ, мм/10 тыс. км	1,2	1,0—1,4	—
Износ за 20 ч, мм	0,12	0,09	—
Износ коллектора, мм/10 тыс. км	0,020	0,028	—

Примечание. Износ на стенде получен при плотности тока $8,3 \text{ А/см}^2$ и частоте вращения 1000 мин^{-1} .

сов или других конструктивных мер по улучшению коммутации на коллекторе;

ограниченность перегрузочной способности.

Количественная оценка этих отрицательных факторов и сопоставление их с недостатками электроприводов переменного тока достаточно затруднительны, так как для конкретного функционально-стоимостного анализа обычно не хватает данных. В связи с этим чаще всего сравнение ограничивается общими соображениями. Между тем для оценки эксплуатационных характеристик коллекторно-щеточного узла имеются результаты многочисленных и серьезных испытаний разработчиков и изготовителей электрощеточных изделий, причем современные типы этих изделий обладают весьма высокими эксплуатационными характеристиками. Примером могут служить показатели двух типов отечественных и одного типа зарубежных электрощеток, приведенные в табл. 3.1.

Если учесть, что проточка коллектора обычно производится при износе $0,2—0,4 \text{ мм}$, то ресурс до проточки по данным табл. 3.1 оказывается равным $60—100 \text{ тыс. км}$. Даже с учетом ряда неблагоприятных факторов эксплуатации эту операцию можно отнести к этапам среднего ремонта двигателей. Учитывая сравнительную простоту операций проточки коллектора, т. е. невысокую стоимость такого ремонта (несмотря на необходимость частичной разборки двигателя), можно считать, что априорные оценки экономических показателей эксплуатации коллекторно-щеточного узла как недопустимо высокие являются в известной мере тенденциозными.

Тем не менее ряд бесспорных преимуществ электродвигателей переменного тока побуждает вести интенсивные исследовательские работы по созданию тяговых систем электромобилей с такими

двигателями. Из них наибольшее внимание уделяется асинхронному двигателю, к преимуществам которого относятся:

простота и технологичность конструкции, что определяет низкую начальную стоимость;

принципиальная возможность выполнения, обеспечивающего высокую частоту вращения, что позволяет заметно улучшить массогабаритные характеристики;

высокий собственный КПД в силу отсутствия ряда составляющих потерь в коллекторно-щеточном узле, добавочных полюсах, а также меньших потерь на возбуждение;

принципиально высокая надежность и малые затраты на уход.

Другие типы электродвигателей переменного тока (синхронные, индукторные и т. п.), во многих отношениях уступающие асинхронному, тем не менее продолжают изучаться применительно к тяговым системам в целях упрощения решения основной проблемы использования двигателей переменного тока, а именно проблемы силового преобразователя частоты. Дело в том, что при первичном источнике энергии постоянного тока применение любого электродвигателя переменного тока вызывает необходимость в соответствующем силовом преобразователе постоянного тока в переменный (преобразователе частоты или коммутаторе тока). Сложность, недостаточная надежность, низкие массогабаритные показатели и высокая начальная стоимость таких преобразователей существенно ухудшают в настоящее время конкурентоспособность тяговых систем переменного тока.

Из большого числа работ по изучению конкурентоспособности различных вариантов тягового электропривода наиболее интересным вариантом является сравнение показателей электродвигателей (табл. 3.2) и силовых преобразователей (табл. 3.3), выполненное сотрудниками фирмы «Дженерал электрик» применительно к перспективному легковому электромобилю ETV-1 [59]. Расчеты выполнялись для движения по стандартному циклу

Таблица 3.2

Сравнительные характеристики электродвигателей

Тип двигателя	Масса, кг	Средний КПД	Относительная стоимость	Примечание
Коллекторный, постоянного тока	99	0,84	1,0	—
Асинхронный с коротко замкнутым ротором	45	0,935	0,26	—
Синхронный с электромагнитным возбуждением	55	0,93	0,32	0,45
Синхронный с постоянными магнитами	45	0,935	0,26	0,40
Синхронный дисковый с постоянными магнитами	34	0,96	0,20	0,40

Характеристики силовых преобразователей

Тип преобразователя	Масса, кг	Средний КПД	Относительная стоимость
Тиристорный импульсный, постоянного тока	22	0,97	1,0
Транзисторный инвертор	39	0,945	1,84
Тиристорный инвертор Мак-Мурри	63	0,90	3,29
Тиристорный инвертор, коммутируемый нагрузкой	68	0,925	1,98
Тиристорный инвертор тока	192	0,905	6,32

SAE j 227, а «D», который вместе с другими стандартными циклами описан далее в п. 3.7.

Соотношения, следующие из данных табл. 3.2 и 3.3, в основном справедливы и для отечественных условий. Можно лишь отметить заниженную оценку стоимости синхронных двигателей в табл. 3.2. Более справедливые данные по относительной стоимости для отечественных условий приведены в графе примечания табл. 3.2.

Данные сравнения вариантов до настоящего времени определяют выводы в пользу тягового электропривода постоянного тока. В частности, этот вариант был принят и для электромобиля ETV-1, создаваемого объединением фирм «Дженерал электрик—Крайслер».

Значительный опыт создания электромобилей, накопленный к настоящему времени, позволяет сформулировать основные требования к тяговой системе электромобиля и его электроприводу в частности. Эти требования целесообразно разделить на четыре группы: функциональные, конструктивные, эксплуатационные и экономические. Ниже приводятся требования, часть из которых является требованиями к электромобилю в целом, но, кроме того, есть ряд требований, которые определяются использованием специфических свойств электропривода; последние по существу расширяют полезные потребительские качества электромобиля как транспортного средства. Все эти требования рассматриваются применительно к городским грузовым и легковым электромобилям, полная масса которых находится в пределах 3 т.

Функциональные требования:

пределы плавного изменения скорости движения от 3 до 70 км/ч;
стабильность автоматического поддержания установленной водителем скорости от 20 до 60 км/ч не ниже 10 %, это позволяет энергетически выгодно двигаться в колонне или потоке городского движения;

плавное управление тяговым моментом при трогании и разгоне;

плавное управление тормозным моментом при скорости выше 15—20 км/ч и его автоматическая стабилизация в любом тормозном режиме;

автоматическое ограничение максимального момента и мощности на заданном уровне;

ограничение зарядного тока батареи при рекуперативном торможении на максимально допустимом для данного состояния батареи уровне;

максимальное использование возможностей рекуперации энергии при торможении или движении под уклон;

возможность движения в режиме выбега (наката) с плавным переходом в режимы тяги или электрического торможения;

реверсирование только после остановки электромобиля.

Конструктивные требования:

масса тягового электропривода не должна превышать 5—6 % от полной массы электромобиля;

узлы и агрегаты тягового электропривода должны выполняться в виде конструктивно законченных модулей, легко заменяемых в условиях эксплуатации;

агрегаты тягового электропривода должны иметь защиту от проникновения посторонних тел и воды, соответствующую месту их установки;

должна быть предусмотрена защита от попадания потенциала на кузов электромобиля, защита электрических цепей от недопустимых перегрузок и коротких замыканий, а при движении электромобиля — от нарушений и сбоев при кратковременных перерывах в питании;

должна быть предусмотрена защита от недопустимых последствий ошибочных действий водителя, например типа блокировки при нарушении предписанной последовательности операций управления.

Эксплуатационные требования:

работоспособность тягового электропривода должна обеспечиваться при температуре окружающей среды в пределах от -40°C до $+40^{\circ}\text{C}$;

бортовая система диагностики должна информировать водителя о месте и общем характере неисправности в тяговой системе в целях прежде всего распознавания следующих возможных ситуаций: отказа в тяговой системе; разряда тяговой батареи и его последствий; частичного нарушения работоспособности; последствий неправильных действий водителя;

восстановление тягового электрооборудования должно заключаться в основном в замене неисправных узлов и агрегатов;

периодичность основного технического обслуживания тягового электропривода: в объеме ТО-1 — через 1000—1500 км пробега, в объеме ТО-2 — через 10—15 тыс. км.

Экономические требования:

начальная стоимость тягового электропривода не должна превышать 15—20 % стоимости электромобиля в целом;

трудоемкость технического обслуживания тягового электропривода не должна превышать 30—40 % от общей трудоемкости технического обслуживания электромобиля в целом.

3.2. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВодОВ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Представителем группы самых простых тяговых электроприводов электромобилей является вариант с электродвигателем последовательного возбуждения и контакторным переключением секций тяговой батареи, применявшейся в электромобилях «Энфилд-8000» (*Enfield 8000*) и с некоторыми изменениями — в электромобилях «Маратон С-300» (*Marathon C-300*). Его упрощенная принципиальная схема показана на рис. 3.1. Электродвигатель *M* с серийной обмоткой *OB* питается от тяговой батареи, четыре секции которой *GB1-CB4* переключаются контакторами *1K—6K*. При этом различные сочетания последовательного и параллельного соединений секции батареи дают четыре ступени напряжения, составляющие для электромобиля «Энфилд-8000» — 12, 24, 36 и 48 В. Таблица включения контакторов на этих ступенях, показанная на правой части рис. 3.1, представляет собой позиции командоаппарата управления электромобилем. В позиции *I* секции батареи соединены параллельно, что соответствует началу разгона, в позиции *IV* секции соединены последовательно. Другие две позиции являются промежуточными. Помимо этого в схеме электропривода предусмотрена реостатная пусковая ступень с резистором *R1*, шунтируемым контактором *K*. Эта ступень используется в дополнение к переключению секций тяговой батареи, что позволяет уменьшить броски тока якоря при разгоне. В приведенном варианте не предусматривается электрическое торможение.

Помимо невысоких характеристик управления и низкой их стабильности, например при изменении напряжения тяговой

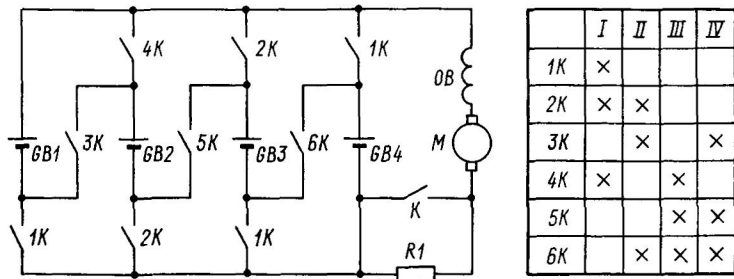


Рис. 3.1. Схема электропривода электромобиля «Энфилд-8000»

батарей из-за ее разряда, низкой экономичности тягового электропривода, плохого использования двигателя из-за бросков тока при пуске, значительным недостатком схемы (рис. 3.1) является низкая надежность большого числа контакторов, имеющих к тому же высокую частоту срабатывания. При этом требуются контакторы с высоким ресурсом главных контактов, обеспечивающих коммутацию пусковых токов двигателя.

Для отечественных электромобилей ЕрАЗ-3734, РАФ-2210, а также УАЗ комплектный тяговый электропривод с электродвигателем последовательного возбуждения типа

ЗДТ84 выполнен по схеме, приведенной на рис. 3.2. Электропривод обеспечивает изменение скорости электромобиля в пределах от 2 до 60 км/ч, электрическое рекуперативное или динамическое торможение при движении «вперед», а также ряд необходимых функций управления движением.

В режиме тяги тиристорный импульсный преобразователь (рис. 3.2) обеспечивает изменение среднего напряжения, подводимого к якорю двигателя от тяговой батареи. Регулирование среднего значения напряжения производится частотно-широтным способом; при этом

$$U_B = \gamma U_B = \frac{t_n}{T_n} U_B, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (3.1)$$

где t_n — длительность импульса напряжения на нагрузке; T_n — период повторения импульсов; U_B — напряжение тяговой батареи.

Дополнительно используется обратная связь по максимально допустимому току якоря двигателя. После выхода преобразователя в насыщение, когда $\gamma = 1$, работа электродвигателя продолжается на естественной характеристике, что обеспечивает увеличение скорости при снижении момента на валу. При необходимости дальнейшего увеличения скорости водитель включает режим ослабления поля, в результате чего контактором $K6$ и резистором $R4$ шунтируется серийная обмотка возбуждения и двигатель переходит на характеристику ослабленного потока возбуждения.

В режиме торможения поддерживается заданное значение тормозного тока, контролируемое на шунте $R2$. Электрическое тор-

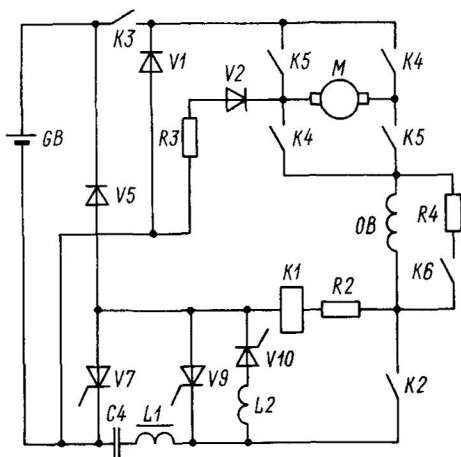


Рис. 3.2. Схема тягового электропривода с двигателем последовательного возбуждения ЗДТ84

можение возможно только при включенном контакторе $K5$, соответствующем направлению движения «вперед». При этом по цепи диода $V2$ и резистора $R3$ происходит подпитка обмотки возбуждения двигателя. Тиристорный коммутатор на вентилях $V7$, $V9$, $V10$ осуществляет замыкание цепи якоря двигателя на вентиль $V1$. При нарастании тока в этой цепи происходит накопление электромагнитной энергии в индуктивных ее элементах. Эта энергия при размыкании цепи коммутатора сбрасывается в батарею через вентили $V5$ и $V1$, образующие с двигателем и тяговой батареей последовательную цепь. Если электромагнитная энергия, запасенная в индуктивностях цепи мала, то происходит динамическое торможение двигателя в интервале замкнутого состояния тиристоров коммутатора.

Конструктивно комплект описанного тягового электропривода состоит из отдельных блоков открытого исполнения, устанавливаемых в специальных отсеках автомобиля. Система управления выполнена на интегральных микросхемах малого и среднего уровней интеграции, а также на навесных элементах. Цепь управления питается от части тяговой батареи напряжением 40 В через преобразователь. Задание скорости или момента на валу при торможении производится от кулачкового командоконтроллера, связанного с осью педали хода.

В настоящее время одним из основных вариантов исполнения тягового электропривода является электропривод с двигателем постоянного тока независимого возбуждения, тиристорным силовым преобразователем в цепи якоря двигателя и транзисторным регулятором тока возбуждения. В различных модификациях этот вариант разработан фирмами «Бош», «Сименс», «Лукас», «Дженерал Моторс» и др. В нашей стране этот вариант разрабатывался Волжским автозаводом совместно с рядом других организаций.

Несколько упрощенная схема электропривода для автомобилей Волжского автозавода показана на рис. 3.3. Якорь двигателя M питается от тяговой батареи GB через силовой преобразователь $СП$ на тиристорах $V1—V4$ и вентилях $V5$, $V6$. Обмотка возбуждения двигателя OB питается от тяговой батареи через транзисторный преобразователь $ПВ$. Реверсирование двигателя производится переключением полярности обмотки возбуждения с помощью контактора KP . Ток в якорной цепи двигателя сглаживается дросселем $Др$. Кроме того, дроссель $Др$ служит в качестве накопителя электромагнитной энергии в режиме импульсного торможения.

Представленная на рис. 3.3 схема предусматривает двухзонное управление скоростью в режиме тяги и двухзонное управление током якоря двигателя или моментом на его валу в режиме торможения. При этом симметричная схема силового преобразователя обеспечивает практически плавный и без переключений переход из одной зоны в другую и из режима тяги в режим торможения и обратно. В системе управления используются обратные

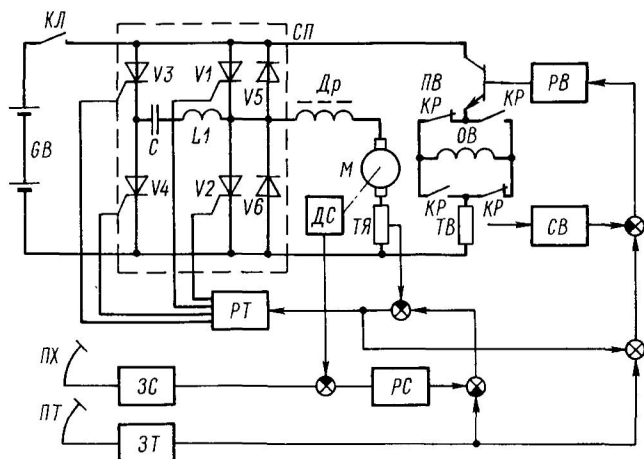


Рис. 3.3. Схема электропривода с тиристорным преобразователем в цепи якоря и двухзонным регулированием

связи по частоте вращения двигателя — датчик *ДС*, току якоря двигателя — датчик *ТЯ* и току возбуждения — датчик *ТВ*. Задание параметров режима тяги производится бесконтактным индуктивным задатчиком *ЗС*, связанным с педалью хода *ПХ*, а установка параметров режима торможения — индуктивным задатчиком *ЗТ*, на который воздействует педаль торможения *ПТ* электромобиля.

Сигналы управления силовым преобразователем *СП* вырабатываются в блоке регулятора тока якоря *РТ*, на входе которого поступают сигналы регулятора скорости *РС* и обратной связи по току якоря с датчика *ТЯ*.

Управление преобразователем возбуждения *ПВ* осуществляет блок регулятора возбуждения *РВ*. На входе этого регулятора действует сигнал ошибки по току якоря и сигнал обратной связи по току возбуждения, сформированный в блоке обратной связи по току возбуждения *СВ*.

Силовой преобразователь осуществляет импульсное частотно-широтное реулирование выходного напряжения с использованием параллельной емкостной коммутации основных тиристоров. В режиме тяги основным является тиристор *V1*, в режиме динамического и импульсного торможения — тиристор *V2*, далее для краткости называемый тормозным. Коммутирующие тиристоры *V3* и *V4* выполняют сменяющие друг друга функции в режимах тяги и торможения. В режиме тяги тиристор *V3* выполняют функцию выключения основного тиристора *V1*, а тиристор *V4* служит для перезаряда коммутирующего конденсатора *С* при подготовке к выключению основного тиристора. В режиме торможения выключающим тормозной тиристор *V2* становится тиристор *V4*.

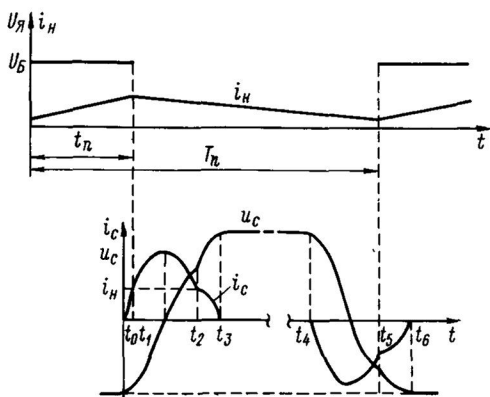


Рис. 3.4. Диаграммы токов и напряжений тиристорного импульсного преобразователя

тяговой батареи. Этим создаются условия для надежного выключения основных тиристоров во всех возможных эксплуатационных режимах.

Работу силового преобразователя поясняют диаграммы выходного напряжения и тока якорной цепи двигателя i_A , показанные для режима тяги на рис. 3.4. В нижней части этого рисунка в более растянутом масштабе по оси времени показаны диаграммы тока через коммутирующий конденсатор i_C и напряжения на этом конденсаторе u_C , поясняющие процессы коммутации тиристоров. Эти процессы, в принципе, не меняются в режимах тяги и электрического импульсного торможения, а изменяется только связь временных интервалов на диаграмме и контуров протекания тока. Для пояснения этой связи в табл. 3.4 приведены контуры, по которым протекает ток коммутирующего конденсатора, и интер-

Таблица 3.4

Интервалы существования контуров коммутации

Интервал	Режим тяги		Режим торможения		Примечание
	Вклю-чаемый тиристор	Контур	Вклю-чаемый тиристор	Контур	
t_0-t_1	V3	C-L1-V1-V3-C	V4	C-V4-V2-L1-C	— $t_{обр}$
t_1-t_2	—	C-L1-V5-V3-C	—	C-V4-V6-L1-C	
t_2-t_3	—	C-L1-V6-GB-V3-C	—	C-L4-GB-V5-L1-C	
t_3-t_4	—	$i_C = 0$	—	$i_C = 0$	—
t_4-t_5	V4	C-V4-V6-L1-C	V3	C-L1-V5-V3-C	—
t_5-t_6	V1	C-V4-GB-V1-L1-C	V2	C-L1-V2-GB-V3-C	—

валы времени, на которых эти контуры существуют для режимов тяги и торможения.

Условия для выключения соответствующего основного тиристора, т. е. $V1$ или $V2$ (рис. 3.3) в зависимости от режима, существуют (это видно из диаграммы процессов коммутации на рис. 3.4) на интервале времени, когда ток коммутирующего конденсатора превышает ток нагрузки. При этом к тиристорам приложено напряжение обратной полярности; в табл. 3.4 этот интервал обозначен $t_{обр}$. Отметим, кроме того, что по диаграмме процессов коммутации включение основных тиристоров $V1$ или $V2$ задержано по отношению к моментам включения зарядных тиристоров $V4$ или $V3$. Соответствующее время задержки $t_{зад}$ отмечено в табл. 3.4. Такой порядок включения тиристоров существенно уменьшает коммутационные потери энергии в силовом преобразователе и тяговой батарее. Сущность этого метода поясняется ниже.

Величины индуктивности $L1$ (рис. 3.3) и емкости коммутирующего конденсатора C выбираются по условию надежного выключения тиристоров $V1$ или $V2$. Следует заметить, что необходимость в достаточно сложном контуре коммутации, содержащем два вспомогательных тиристора, батарею конденсаторов и индуктивность, заметно сказывается на экономических показателях рассматриваемого варианта электропривода. Указанные элементы определяют примерно половину стоимости силовой части преобразователя, или около 20—25 % его полной стоимости.

Транзисторный преобразователь возбуждения, работающий в широтно-импульсном режиме с относительно высокой частотой коммутации, обеспечивает быстродействующее регулирование тока возбуждения двигателя, что необходимо для обеспечения устойчивости электродвигателей независимого возбуждения при больших токах якоря, когда возникает сильно действующая реакция якоря. В этом режиме ток возбуждения должен регулироваться таким образом, чтобы скомпенсировать действие реакции якоря.

Регулирование тока якоря двигателя с помощью силового преобразователя СП производится в первой зоне работы тягового двигателя, когда напряжение на его якоре меньше, чем напряжение батареи

$$U_{я} = \gamma U_{б} = c\omega\Phi + Ri_{н} + L \frac{di_{н}}{dt},$$

причем $\gamma < 1$.

При увеличении частоты вращения двигателя ω напряжение $U_{я}$ становится равным $U_{б}$, т. е. $\gamma = 1$. Коммутация тиристора $V1$ прекращается, и дальнейшее увеличение частоты вращения производится за счет ослабления магнитного потока возбуждения двигателя Φ или тока возбуждения двигателя с помощью преобразователя возбуждения $ПВ$. Таким образом, во второй зоне работы тягового двигателя потери на коммутацию тиристорov в си-

ловом преобразователе отсутствуют и остаются только статические потери энергии в открытом тиристоре $V1$.

В режиме торможения также существуют две зоны работы тягового двигателя. В зоне больших значений частоты вращения увеличение магнитного потока возбуждения двигателя переводит его в генераторный режим работы, так как напряжение на якоре двигателя становится больше ЭДС батареи. От двигателя к батарее при этом протекает ток

$$I_3 = \frac{c\omega\Phi - (U_B + \Delta E_3)}{R_3},$$

где ΔE_3 — повышение напряжения батареи при заряде; R_3 — суммарное сопротивление цепи заряда батареи.

По мере снижения скорости ток заряда батареи также начинает уменьшаться и при граничной частоте вращения двигателя ω'

$$c\omega'\Phi = U_B + \Delta E_3$$

становится равным нулю.

Однако для сохранения тормозных свойств и улучшения энергетики еще при $\omega > \omega'$ начинается периодическое включение тормозного тиристора $V2$, который замыкает цепь якоря двигателя через дроссель Dp . В замкнутом контуре $M-Dp-V2-M$ происходит нарастание тока под действием ЭДС двигателя в соответствии с уравнением

$$c\omega\Phi = L \frac{di_T}{dt} + R_T i_T,$$

где R_T — суммарное сопротивление этого замкнутого контура.

Интервал замкнутого состояния контура (по табл. 3.4) $t_5 - t_1$ соответствует режиму динамического торможения двигателя. Затем в момент времени t_0 происходит включение тиристора $V4$, и под действием обратного напряжения конденсатора C на интервале $t_1 - t_2$ тиристор $V2$ выключается. В этот момент ЭДС двигателя и ЭДС самоиндукции, определяемая в основном индуктивностью дросселя Dp , оказываются в сумме больше, чем напряжение на батарее, и через вентиль $V5$ начинает протекать ток в батарею. Возникает режим рекуперативного импульсного торможения, длительность которого Δt_p зависит от начальной энергии, накопленной в индуктивности дросселя и отдаваемой в батарею согласно уравнения баланса энергии (без учета потерь в резистивных элементах)

$$\int_{t_2}^{t_2 + \Delta t_p} U_B(t) i_3(t) dt = L \frac{i_T^2(t_2) - i_T^2(t_2 + \Delta t_p)}{2},$$

где $i_T(t_2)$, $i_T(t_2 + \Delta t_p)$ — соответственно начальное и конечное значения тока через дроссель Dp .

Средний тормозной момент на валу двигателя оказывается равным

$$M_{т. ср} = \frac{c\Phi}{T_n} \left[\int_{t_2}^{t_2 + \Delta t_p} i_3(t) dt + \int_{t_4}^{t_2} i_1(t) dt \right], \quad (3.2)$$

считая, что за период коммутации силового преобразователя магнитный поток не успевает измениться.

По мере снижения частоты вращения двигателя соотношение между длительностью интервалов Δt_p и $t_5 - t_2$ изменяется за счет уменьшения интервала импульсной рекуперации энергии в батарею и увеличения интервала динамического торможения (пока интервал рекуперации не станет равным нулю). Режим динамического торможения в конце концов становится непрерывным, т. е. тиристор $V2$ продолжает оставаться все время открытым, однако область существования этого режима и его роль в энергетике и управлении автомобилем достаточно мала. В связи с этим зону существования этого непрерывного режима обычно объединяют с зоной импульсного торможения и не рассматривают в виде третьей зоны.

Появление силовых транзисторов на токи порядка десятков и сотен ампер способствовало разработке ряда вариантов тяговых электроприводов автомобилей с транзисторными силовыми преобразователями в цепи якоря двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Типичными для этого направления являются работы французской фирмы «Рагоно» и американских — «Дженерал Электрик» и «Крайслер».

Фирмой «Рагоно» создан электропривод для автомобилей полной массой около 1200 кг, причем в качестве опытных образцов использовались конвертированные автомобили «Рено 5L (Renault 5L)». Привод осуществляется от двигателя номинальной мощностью 6 кВт при номинальной частоте вращения 5000 мин⁻¹ и напряжении 96 В. В схеме электропривода предусмотрено два транзисторных импульсных преобразователя. Силовой преобразователь в цепи якоря состоит из параллельного соединения 11 групп по три транзистора в каждой. При номинальном токе якоря двигателя 75 А и кратности максимального тока около 4 А максимальная токовая нагрузка на транзистор не превышает 10 А. Каждая группа транзисторов снабжена защитной индуктивностью и обратным диодом. Силовой преобразователь работает с постоянной частотой коммутации 700 Гц и обеспечивает изменение относительной длительности импульсов выходного напряжения от 0,05 до 1. Регулирование скорости по возбуждению осуществляется до максимальной частоты вращения 7000 мин⁻¹ с помощью транзисторного преобразователя, рассчитанного на изменение тока возбуждения от 2 до 8 А при постоянной частоте коммутации 1000 Гц.

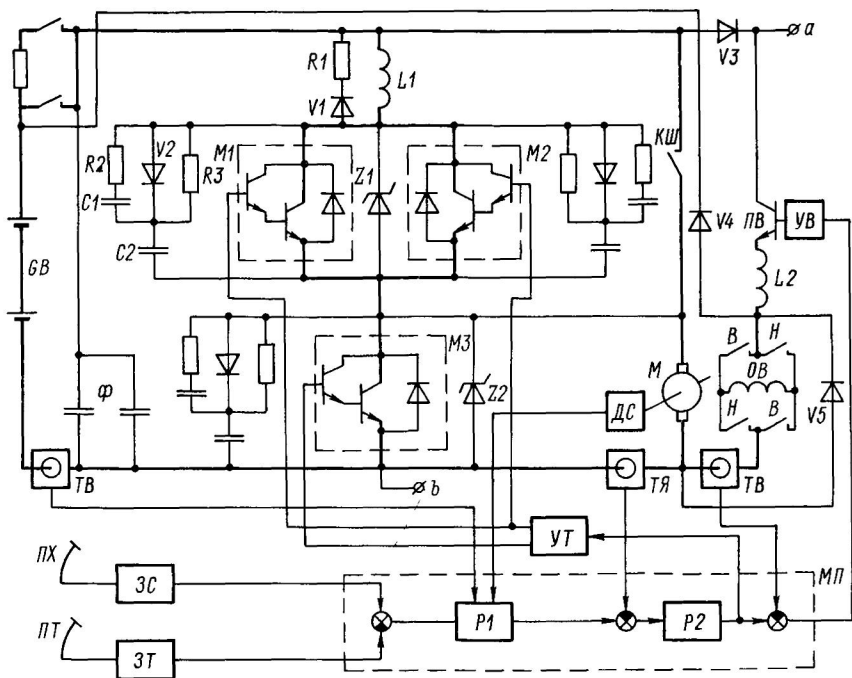


Рис. 3.5. Схема электропривода электромобиля ETV-1 с транзисторным преобразователем фирмы «Дженерал электрик»

Принципиальная схема электропривода, разработанного фирмой «Дженерал Электрик» для экспериментального электромобиля ETV-1 фирмы «Крайслер», показана на рис. 3.5. По общей структуре этот электропривод близок к варианту двухзонного регулирования, приведенному на рис. 3.3. Двигатель постоянного тока независимого возбуждения *М* питается от тяговой батареи *ГВ* через силовой преобразователь цепи якоря. Обмотка возбуждения *ОВ* получает питание через преобразователь возбуждения *ПВ*.

Главной отличительной особенностью является использование мощных силовых транзисторов. Фирмой было предварительно проведено исследование ряда вариантов транзисторных преобразователей с использованием силовых транзисторов различных фирм 2SD648 фирмы «Тосиба» (*Toshiba*) на 200 А, 300 В; RSD-751 фирмы EVC на 100 А, 450 В и ряда других; после этого был разработан собственный силовой модуль (*М1—М3* на рис. 3.5). Этот модуль представляет сборку из двух транзисторов по схеме Дарлингтона и шунтирующего обратного диода.

Параметры силового транзистора по схеме Дарлингтона:

Напряжение коллектор-эмиттер	350 В
Напряжение насыщения при токе 200 А	1,6 В
Номинальный ток	200 А

Коэффициент усиления по постоянному току при номинальном токе коллектора	250
Время спада тока коллектора	1,2 мкс
Время задержки	2,6 мкс

Два модуля $M1$ и $M2$ (рис. 3.5) соединены параллельно, и через них осуществляется импульсное питание якоря двигателя в режиме тяги. При этом в режиме разгона с максимальным ускорением ток достигает 400 А, причем допускаемая силовым преобразователем длительность такого тока составляет 1 мин. Для длительного режима номинальный ток преобразователя составляет 200 А, что согласовано с характеристиками применяемого электродвигателя, имеющего номинальный длительный ток 175 А.

В режиме электрического импульсного торможения якорь двигателя M замыкается транзисторным модулем $M3$, что позволяет иметь максимальный ток якоря при торможении 200 А в течение 1 мин и 100 А длительно. При периодическом замыкании цепи якоря происходит накопление электромагнитной энергии в индуктивностях якоря и добавочных полюсов двигателя, которая затем сбрасывается в аккумуляторную батарею GB по цепям обратных диодов силового преобразователя.

Индуктивность $L1$ предназначена для защиты транзисторных модулей от перенапряжений при коммутации аппаратов в электроприводе. Сброс накопленной в этой индуктивности энергии при отключении цепи под током обеспечивает параллельная защитная цепь из вентиля $V1$ и резистора. Защита транзисторных модулей от недопустимых режимов при включении и выключении транзисторов производится специальными защитными цепями из конденсаторов $C1$, $C2$, вентиля $V2$ и резисторов $R1$, $R2$. Кроме того, от перенапряжений цепи коллектор-эмиттер защищены диодами Зенера $Z1$ и $Z2$.

Транзисторный силовой преобразователь работает при сравнительно высокой частоте переключений. Эта частота непостоянная, а изменяется при изменении скважности, достигая максимальной величины 2000 Гц. Для компенсации индуктивного сопротивления аккумуляторной батареи и проводов монтажа вход силового преобразователя шунтирован батареей конденсаторов Φ суммарной емкостью 1200 мкФ.

Преобразователь возбуждения PB осуществляет регулирование тока возбуждения в пределах от 2,0 до 10,6 А при постоянной частоте коммутации выходного транзистора, равной 9500 Гц. Вентили $V3$ — $V5$ служат для защиты выходного транзистора. Вместе с тем некоторые схемные особенности преобразователя PB определяются тем, что в автомобиле ETV-1 этот преобразователь выполняет вторую функцию — бортового зарядного выпрямителя. В этом режиме напряжение однофазной сети 115 В подается через мостовой однофазный выпрямитель (на схеме рис. 3.5 не показан) в точки a — плюсом и b — минусом. В цепи заряда тяговой батареи оказывается при этом включенной индуктив-

ность $L2$, сглаживающая ток заряда батареи. В этом режиме преобразователь $PВ$ работает с переменной частотой коммутации 5—15 кГц и при регулируемом токе заряда от 2 до 24 А.

Реверсирование электродвигателя производится переключением полярности обмотки возбуждения OB с помощью контакторов B и H .

Управление электроприводом предусматривается с помощью микропроцессора $МП$ по структуре, показанной на рис. 3.5. Педали хода и торможения связаны с задающими потенциометрами, которые определяют сигналы управления тяговым и тормозным моментом. Магнитные датчики тока якоря двигателя $ТЯ$, тока возбуждения $ТВ$ и тока батареи $ТБ$ совместно с сигналами по напряжению батареи и частоте вращения двигателя $ДС$ участвуют в процессе вычисления момента на валу. Через устройства интерфейса $УВ$ и $УТ$ микропроцессор управляет работой преобразователей питания якоря и возбуждения $PВ$ в соответствии с заданным тяговым или тормозным моментом. Так как при форсировке тока возбуждения двигателя до 10,6 А частота вращения двигателя составляет 1800 мин^{-1} , то работа преобразователя питания якоря происходит в зоне от этой скорости и почти до нуля. При частоте вращения от 1800 до 5000 мин^{-1} силовой преобразователь питания якоря находится в режиме насыщения и, кроме того, шунтируется контактором $КШ$. По этой шунтирующей преобразователь цепи осуществляется и режим генераторного торможения на больших частотах вращения.

Современные конструкции электродвигателей постоянного тока с независимым возбуждением, регулируемым в достаточно широких пределах, создают основу для построения тяговых электроприводов, не имеющих импульсных преобразователей со сложными устройствами принудительной коммутации тиристоров в якорной цепи двигателя. Такие электроприводы разработаны в СССР лабораторией электромобилей НАМИ, а за рубежом — рядом японских фирм.

Принципиальная схема электропривода электромобиля НАМИ-0189Э показана на рис. 3.6. Тяговый двигатель M питается от двух блоков тяговой батареи $GB1$ и $GB2$, которые включаются в его цепь либо параллельно, либо последовательно с помощью контакторов KB . В якорной цепи двигателя, кроме того, находятся пусковые резисторы $R1$ и $R2$, шунтируемые контактором $КШ$. Ток возбуждения двигателя регулируется тиристорным импульсным преобразователем, содержащим основной тиристор $V2$ и коммутирующий — $V3$. Реверс двигателя производится контактором $КР$, переключающим полярность напряжения на обмотке возбуждения OB . Режимы работы электропривода задаются специальным командоконтроллером. Этот аппарат, управляемый водителем, содержит переключатели режимов, а также индуктивный датчик, положение которого определяет с помощью блока управления $БУ$ величину тока возбуждения. В свою

очередь, ток возбуждения двигателя определяет величину тока якоря

$$I = \frac{1}{R} [U_{\text{п}} - c\omega\Phi(I_{\text{в}})], \quad (3.3)$$

а также динамический момент на валу двигателя

$$M_{\text{дин}} = \frac{c}{R} (U_{\text{п}}\Phi(I_{\text{в}}) - c\omega\Phi^2(I_{\text{в}})) - M_{\text{с}}. \quad (3.4)$$

В установившихся режимах работы двигателя $M_{\text{дин}} = 0$ и из выражения (3.4) следует, что ток возбуждения определяет частоту вращения согласно формуле

$$\omega = \frac{U_{\text{п}}}{c\Phi(I_{\text{в}})} - \frac{R}{c^2\Phi^2(I_{\text{в}})} M_{\text{с}}, \quad (3.5)$$

где $U_{\text{п}}$ — напряжение питания цепи якоря двигателя; причем

$$U_{\text{п}} = \begin{cases} U_{\text{б}}/2, & \text{когда } \text{КБ} \text{ выключен;} \\ U_{\text{б}}, & \text{когда } \text{КБ} \text{ включен.} \end{cases}$$

С помощью блока управления БУ отрицательными обратными связями по току батареи и направлению на обмотке возбуждения двигателя осуществляется стабилизация заданных значений тока возбуждения и тока батареи, а тем самым и режимов движения согласно выражениям (3.4) и (3.5).

При трогании электромобиля блоки батареи соединены параллельно, включением контактора K начинается пуск двигателя на первой реостатной ступени через резистор $R1$. Возбуждение двигателя устанавливается при этом близким к максимальному. Дальнейшее нажатие на педаль хода и воздействие тем самым на командоконтроллер при разгоне электромобиля вызывает включение второй реостатной ступени путем подключения параллельно резистору $R1$ резистора $R2$ через тиристор $V1$. При снижении пускового тока включается контактор $KШ$ и закорачивает пусковые реостаты. Тиристор $V1$ при этом возвращается в отключенное состояние. Дальнейшее управление производится изменением тока возбуждения. При достижении скорости 30 км/ч командоконтроллером осуществляется переключение блоков батареи на последовательное соединение и продолжается управление посредством изменения тока возбуждения.

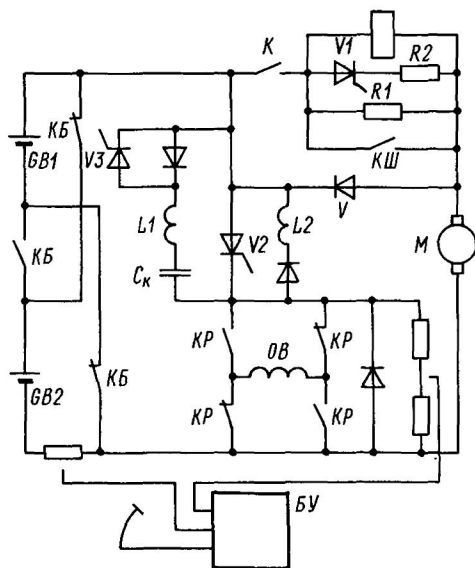


Рис. 3.6. Схема электропривода с переключением секций батареи и регулированием по возбуждению

Рекуперативное торможение наступает при увеличении тока возбуждения и возрастании из-за этого ЭДС двигателя. Через диод V начинает протекать ток заряда батареи как при последовательном соединении блоков, так и при параллельном. Диапазон возможного рекуперативного генераторного торможения D_p зависит от используемого ослабления потока возбуждения двигателя и может быть определен из следующей зависимости:

$$D_p = \frac{v_p}{v_{\max}} = \frac{\Phi_{\min}(I_B)}{2\Phi_m} \left(1 + \frac{\Delta E_B}{U_B}\right), \quad (3.6)$$

где Φ_m — магнитный поток насыщения двигателя; Φ_{\min} — минимальное значение магнитного потока, допустимое в установившемся режиме; ΔE_B — повышение ЭДС блока батарей при заряде; v_p — наименьшая скорость в режиме рекуперации.

Для современных двигателей независимого возбуждения чаще всего $\Phi_{\min}/\Phi_m = 1/3$, поэтому диапазон рекуперативного торможения $D_p \approx 1/5 \div 1/6$.

При скоростях, меньших v_p , электрическое торможение в рассматриваемой системе электропривода отсутствует.

Другие варианты исполнения этой системы тягового электропривода отличаются использованием транзисторного регулятора возбуждения вместо тиристорного, схемами реостатного пуска, а также структурой и исполнением устройств управления, таких как датчики обратных связей, блоки управления током возбуждения и включением резисторов. Следует заметить, что для реализации электропривода с основным регулированием по возбуждению тяговый электродвигатель должен иметь запас по условиям коммутации на коллекторе и высокую надежность цепей возбуждения. В связи с этим необходимы дополнительные затраты на электродвигатель.

В некоторых японских автомобилях подобная упрощенная схема тягового электропривода дополняется редуктором с переключением передач, т. е., по существу, коробкой перемены передач. Хотя ограниченность максимальной скорости автомобиля позволяет иметь только двухступенчатый редуктор, ручное его переключение существенно усложняет управление автомобилем. Однако по мнению фирмы-изготовителя это неудобство компенсируется снижением стоимости автомобиля за счет упрощения электрической тяговой системы. При этом снижение требований по величине момента на валу двигателя при разгоне позволяет уменьшить мощность двигателя, а это приводит к уменьшению мощности всех элементов силовой цепи, в том числе и тяговой аккумуляторной батареи.

Основные проблемы тяговых электроприводов переменного тока связаны с разработкой преобразователей частоты. Тиристорные преобразователи имеют значительную сложность и очень низкие надежность и массогабаритные параметры. Эти параметры определяются характеристиками устройств принудительного вы-

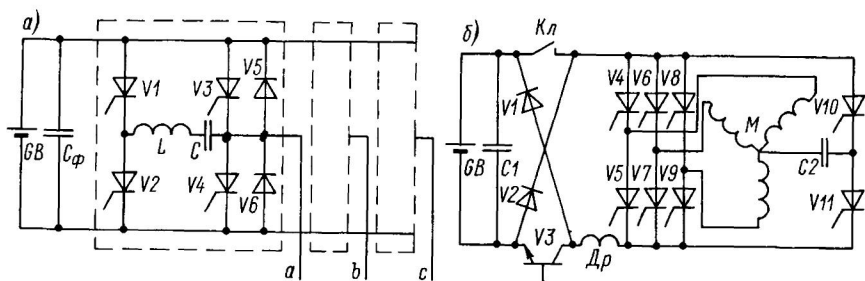


Рис. 3.7. Варианты схем тиристорных инверторов: а — инвертор Мак-Мурри; б — электропривод с инвертором, коммутируемым нагрузкой

ключения, или иначе — коммутации тиристоров. По этим причинам в настоящее время продолжается интенсивный поиск схемных решений, позволяющих упростить эти устройства. Классическим вариантом тиристорного преобразователя частоты принято считать так называемый инвертор Мак-Мурри. Схема такого инвертора, рассматриваемого в качестве базового, показана на рис. 3.7, а. Из этого рисунка следует, что одна фаза инвертора Мак-Мурри (схемно, да и по работе устройств коммутации) совпадает с импульсным преобразователем постоянного тока, ранее описанным применительно к схеме, приведенной на рис. 3.3. Уже из этого следует, что электропривод переменного тока с инвертором Мак-Мурри примерно в 2,5—3 раза дороже, чем тяговая система постоянного тока с тиристорным импульсным преобразователем.

Из сравнительно новых схемных решений преобразователей частоты представляет определенный интерес тиристорный инвертор, коммутируемый нагрузкой. Этот вариант преобразователя частоты рассматривался применительно к электромобилю ETV-1 фирмы «Дженерал электрик—Крайслер» и имел определенные преимущества перед инвертором Мак-Мурри (см. табл. 3.3).

Упрощенная принципиальная схема силовой части электропривода переменного тока с асинхронным двигателем и тиристорным инвертором, коммутируемым нагрузкой, показана на рис. 3.7, б. По этой схеме общий узел коммутации с коммутирующим конденсатором C_2 и тиристорами V_{10} , V_{11} использует индуктивности фазных обмоток тягового двигателя M . Это позволяет заметно упростить схему выходной части преобразователя, в которой тиристоры V_4 — V_9 образуют собственно коммутатор фазных токов двигателя. Вентили V_1 и V_2 используются для рекуперации энергии в тяговую батарею GB и обмена реактивной энергией двигателя с накопительным конденсатором C_1 . Транзистор V_3 и дроссель D_p не являются собственно элементами инвертора, а осуществляют регулирование тока на входе инвертора, что позволяет улучшить его характеристики.

Параметры силовых транзисторов

Параметр	2SD648	TK152-100
Максимально допустимый ток коллектора, А	400	100
Максимально допустимое напряжение коллектор—эмиттер, В	300	300
Максимально допустимая температура перехода, °С	150	150
Напряжение насыщения коллектор—эмиттер, В	2,5	2,0
Максимальный коэффициент передачи тока	800	100
Время выключения не более, мкс	10	4
в том числе:		
время рассасывания	8	3
время спада	2	1

Из данных табл. 3.3 следует, что в схеме тиристорного инвертора, коммутируемого нагрузкой, достигается существенное снижение начальной стоимости, а также повышение среднего КПД по сравнению с инвертором Мак-Мурри, однако массогабаритные показатели ухудшаются, что определяется увеличением массы коммутирующего и накопительного конденсаторов. Конкуренентоспособность этой схемы оказывается в сравнении с электроприводом постоянного тока недостаточной.

Перспективы тягового электропривода переменного тока в настоящее время принято связывать с созданием и совершенствованием новых силовых полупроводниковых приборов: мощных транзисторов, двухоперационных тиристоров, тиристоров с комбинированным выключением и др.

Ранее были приведены характеристики силового транзисторного модуля фирмы «Дженерал электрик». Параметры мощного транзистора 2SD648 фирмы «Тосиба» и отечественного транзистора TK152-100 даны в табл. 3.5. В дополнение к данным таблицы следует отметить, что транзистор 2SD648 был выпущен впервые около 15 лет назад, однако стоимость его остается примерно на порядок выше стоимости тиристора с теми же характеристиками, исключая время выключения, которое у тиристора в 2—2,5 раза больше.

Следует иметь в виду, что использование транзисторных ключей в силовых преобразователях требует защиты их от бросков тока и перенапряжений, к которым транзисторы очень чувствительны. Такая защита обеспечивается дополнительными элементами формирования траекторий переключения транзисторов, приведенных на рис. 3.5. Современные высокочастотные силовые полупроводниковые приборы представляют по существу развитые по структуре интегральные микросхемы большой мощности. С этой точки зрения отличие силовых транзисторов от полупроводниковых приборов других типов заключается в том, что транзистор

представляет усилительную микросхему, тогда как двухоперационные тиристоры — двухстабильные схемы релейного действия. В связи с этим мощные двухоперационные тиристоры или другие приборы ключевого типа для преобразователей импульсного действия (в том числе инверторов) являются перспективными.

Если продвижение в области создания компактных, надежных и достаточно дешевых инверторов в настоящее время можно считать недостаточным для разработки эффективного тягового электропривода переменного тока, то при построении систем управления таким электроприводом достигнут большой опережающий задел. Разработанная первоначально теория частотно-токового управления электрическими машинами переменного тока [10, 61] в последние годы была значительно развита В. И. Уткиным и его сотрудниками на основе общей теории систем с переменной структурой и использования «скользящих» режимов в таких системах [15, 43].

Применение «скользящих» режимов для электроприводов с импульсными силовыми преобразователями является органичным в силу разрывного характера работы ключевых элементов преобразователя. Рассмотрим в качестве примера систему управления асинхронным электродвигателем. Схема электропривода показана на рис. 3.8; причем силовой преобразователь типа инвертора напряжения показан в виде набора ключевых элементов $K1—K3$ трехпозиционного типа, соединяющих фазные обмотки двигателя M с «плюсом» или «минусом» тяговой батареи GB . При этом фазные напряжения U_R, U_S, U_T формируются в зависимости от знаков релейных управляющих сигналов U_R^*, U_S^*, U_T^* соответственно. Исходя из задач управления тяговым электродвигателем с учетом минимизации потерь энергии за счет воздействия на магнитный поток двигателя (аналогично управлению двигателем постоянного тока с воздействием на ток возбуждения), «скользящий» режим задается вдоль поверхности $S = 0$. Проекции вектора S выбираются при этом в виде:

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= M - M_z; \\ S_2 &= c_1 (|\psi| - \psi_z) + \frac{d(|\psi| - \psi_z)}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

где M и M_z — соответственно фактическое и заданное значения электромагнитного момента двигателя; ψ, ψ_z — фактическое (вычисленное) и заданное значения потокосцепления; $c_1 = \text{const}$.

Условие существования «скользящего» режима [43] имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} S_1 \dot{S}_1 &< 0; \\ S_2 \dot{S}_2 &< 0 \end{aligned} \right. \quad (3.8)$$

и совместно с выражением (3.7) определяет алгоритм формирования управляющих воздействий $U_{\alpha z}$ и $U_{\beta z}$.

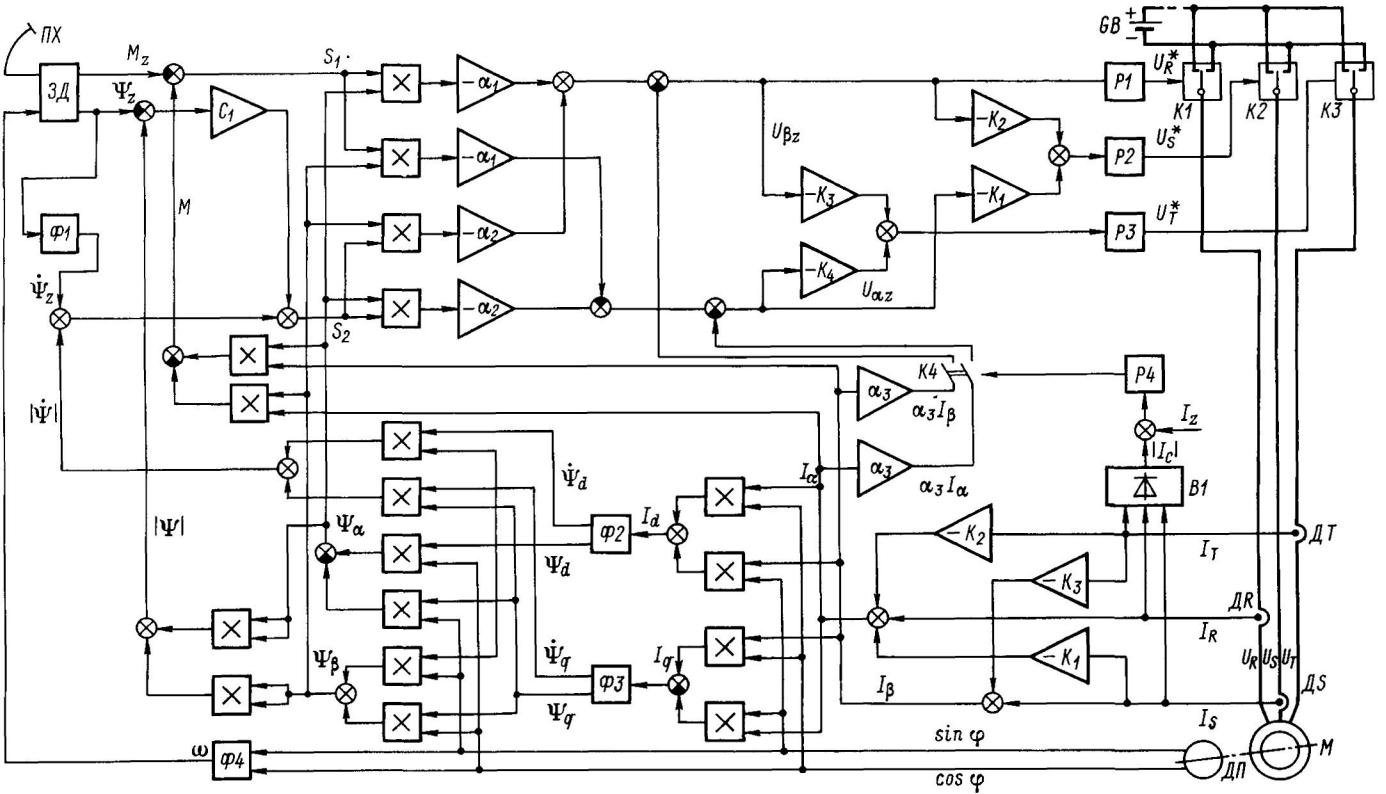


Рис. 3.8. Схема асинхронного электропривода с управлением в «скользящих» режимах

Таким образом, схема системы управления, показанная на рис. 3.8, может быть разделена на следующие основные функциональные блоки:

формирователи задания движения $ЗД$ и ΦI , управляемые от педали хода ($ПХ$), с выходными переменными M_z , ψ_z и $\dot{\psi}_z$;

формирователь проекций вектора S , определяемых по формуле (3.7);

формирователь управляющих напряжений $U_{\alpha z}$, $U_{\beta z}$;

ограничитель модуля тока статора $|I_c|$ в виде задержанной обратной связи, состоящей из выпрямителя $ВI$, релейного элемента задержки $P4$, ключевого элемента $K4$;

преобразователь управляющих напряжений $U_{\alpha z}$, $U_{\beta z}$ в трехфазную систему U_R^* , U_S^* , U_T^* ;

датчики фазны токов $ДR$, $ДС$, $ДТ$ и угла поворота ротора $ДП$;

формирователь частоты вращения двигателя $\Phi 4$;

блок вычисления электромагнитного момента M , потокосцепления ψ и производной потокосцепления $\dot{\psi}$;

Этот последний блок, показанный в нижней части схемы, представляет собой модель двигателя, в которой производятся следующие преобразования измеренных переменных состояния двигателя;

трехфазных компонент тока статора I_R , I_S , I_T в двухфазную систему согласно выражениям:

$$\begin{cases} I_\alpha = I_R - K_1 I_S - K_2 I_T; \\ I_\beta = I_S - K_3 I_T; \end{cases} \quad (3.9)$$

переход к вращающейся системе координат:

$$\begin{cases} I_d = I_\alpha \cos \varphi + I_\beta \sin \varphi; \\ I_q = I_\beta \cos \varphi - I_\alpha \sin \varphi; \end{cases} \quad (3.10)$$

определение компонент потокосцепления ротора ψ_d и ψ_q и их производных $\dot{\psi}_d$, $\dot{\psi}_q$ в соответствии с уравнениями Парка:

$$\begin{cases} \frac{R_r}{x_r} \psi_d + \dot{\psi}_d - \frac{x_h R_r}{x_r} I_d = 0; \\ \frac{R_r}{x_r} \psi_q + \dot{\psi}_q - \frac{x_h R_r}{x_r} I_q = 0; \end{cases} \quad (3.11)$$

определение этих компонент производится в блоках $\Phi 2$ и $\Phi 3$;

переход к неподвижной системе координат (α , β) для компонент потокосцепления ротора в соответствии с выражениями:

$$\begin{cases} \psi_\alpha = \psi_d \cos \varphi - \psi_q \sin \varphi; \\ \psi_\beta = \psi_d \sin \varphi + \psi_q \cos \varphi; \end{cases} \quad (3.12)$$

определение электромагнитного момента

$$M = \psi_\alpha I_\beta - \psi_\beta I_\alpha; \quad (3.13)$$

определение модуля потокосцепления ротора

$$|\psi| = \psi_{\alpha}^2 + \psi_{\beta}^2; \quad (3.14)$$

определение производной модуля потокосцепления

$$|\dot{\psi}| = 2\psi_{\alpha}\dot{\psi}_{\alpha} + 2\psi_{\beta}\dot{\psi}_{\beta}. \quad (3.15)$$

В блоке вычисления электромагнитного момента, потокосцепления и его производной в данном варианте используется первичная информация, получаемая от датчиков тока статора и положения ротора, которую можно рассматривать как наименьшую и наиболее просто получаемую практически. Такая ограниченность первичной информации определяет необходимость довольно сложной ее обработки с целью получения переменных состояния, формирующих вектор S . При развитии системы первичных датчиков этот наиболее сложный из блоков системы управления может быть существенно упрощен. Заметим, что для этого, например, может быть осуществлена встройка в двигатель датчиков потокосцепления или просто магнитного потока, что является технически вполне осуществимым. Реализация данного блока оказывается простой при использовании также микропроцессорного управления с блоками ускоренного умножения.

В настоящее время разработан ряд вариантов систем переменной структуры, реализующих «скользящие» режимы управления двигателями различных типов, в том числе синхронных и вентильных двигателей. Испытания опытных образцов подтверждают высокую их эффективность и, в частности, высокое качество управления, инвариантность к основным возмущениям, существенное упрощение схемной и конструктивной реализации устройств управления двигателями переменного тока.

3.3. ВЫБОР КОНСТРУКТИВНЫХ ВАРИАНТОВ ИСПОЛНЕНИЯ АГРЕГАТОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Большая работа по совершенствованию и оптимизации конструкций тяговых электродвигателей постоянного тока, которая проводилась в ряде фирм и организаций многих стран, привела в настоящее время к довольно близким результатам. В табл. 3.6 приведены основные характеристики электродвигателей постоянного тока для электромобилей ведущих фирм, определяющих мировой уровень развития в этой области.

Из таблицы следует, что для современных электродвигателей электромобилей характерно использование сравнительно больших номинальных и максимальных частот вращения. Последняя величина составляет в большей части 6000—7000 мин⁻¹. Эта тенденция к увеличению скорости обусловлена стремлением повысить удельные мощностные характеристики и снизить массу двигателя. Ограничением служат только условия работы коллекторно-щеточного узла, в частности максимальная скорость на диаметре кол-

Характеристики электродвигателей постоянного тока для электромобилей

Фирма, страна-изготовитель электродвигателей	Тип электромобиль, фирма	Высота оси вращения, мм	Мощность, кВт		Частота вращения, мин ⁻¹		Момент максимальный, Н·м	Масса, кг	Число полюсов	Напряжение, В	Ток якоря, А	
			номинальная	максимальная	номинальная	максимальная					номинальный	максимальный
ВАЗ, СССР	ВАЗ-2801, ВАЗ-2702	125	12	25	2600	6700	115	67	6	120	120	250
«Бош», ФРГ	—	136	11	22	2400	6700	96	67	6	144	—	200
«Полетти» (Poletti), Италия	900/E2 Фнат	132	12	26	2000	4500	—	—	4	96	160	400
«Полетти», Италия	E-2	132	23	47	1800	4500	—	—	4	180	160	400
«Дженерал моторс», США	EV-1	—	16,8	25	2400	7000	96	80	4	110	—	250
«Ниппон Дэнсо» (Nippon Denso), Япония	E1	124	12	26,3	3200	4640	80	70	4	100	140	—
ВВС, ФРГ	«Ситиштремер», «Фольксваген»	160	12	24	2170	6600	—	80	4	90	—	—
«Дженерал электрик», США	ETV-1, «Крайслер»	152	15	32	2500	5000	92	98	4	96	175	400
«Сименс», ФРГ	ET «Фольксваген»	152	16	32	2400	6700	160	80	6	144	—	300
ВАЗ, СССР	РАФ, УАЗ	146	19	40	2540	6200	195	95	6	120	180	400
«Бош», ФРГ	—	178	26	52	2400	6700	—	100	6	144	—	250
РЭЗ, СССР	ЕрАЗ	—	21	38	3900	5500	—	125	4	110	230	500
«Лукас», Англия	«Лукас-Бедфорд»	143	22	40	—	—	270	—	—	216	—	—

лектора, при которой сохраняется достаточно хорошее прилегание щетки к коллектору.

Номинальный режим работы электродвигателей выбирается при ослабленном на 20—30 % по отношению к максимальному магнитному потоку возбуждения. Эта точка рабочих характеристик является в определенной мере условной и соответствует обычно максимуму КПД при скорости электромобиля около 35—40 км/ч, которая для внутригородских условий движения таких транспортных средств может считаться наиболее часто используемой.

Практически для всех используемых двигателей принято защищенное исполнение и воздушное охлаждение с продувом от встроенного или независимого вентилятора. Принимаются специальные меры по повышению коммутационной устойчивости и усилению коллекторного узла двигателей. Близость принятых решений во многом определяется выбором номинального напряжения, величина которого чаще всего составляет 100—140 В, при этом запас по напряжению тяговой батареи равен 8—10 %.

Близость достигнутого уровня характеризуется таким примером: при достаточно существенном различии конструкций (в частности, по числу полюсов) электродвигатель электромобиля *ETV-1* фирмы «Дженерал электрик» имеет моментную постоянную — отношение момента на валу двигателя к соответствующему току якоря — 0,484 Н·м/А, а электродвигатели ПТ-125 и ПТ-146 Волжского автозавода — 0,46—0,48 Н·м/А.

На примере этих двигателей отметим некоторые особенности тяговых машин электромобилей малых классов. Максимальная степень искрения на коллекторе, равная $1\frac{1}{2}$ —2 балла, достигается применением полного числа добавочных полюсов, мелкозубчатой структурой якоря и использованием маловитковых секций обмотки якоря с относительно малой индуктивностью. Такие секции имеют к тому же высокую технологичность изготовления и укладки в пазы якоря, что компенсирует повышение трудоемкости изготовления коллектора со сравнительно большим числом коллекторных пластин, достигающим 85.

Для ослабления размагничивающего действия реакции якоря при высоких перегрузках воздушный зазор под главными полюсами принимается неконцентрическим: под серединой полюса он составляет 0,9—1,2 мм, а под краями полюса — 2,0—2,2 мм. Для повышения устойчивости работы двигателя на максимальной скорости главные полюса снабжены легкой одновитковой стабилизирующей обмоткой.

Электродвигатели имеют реактивные щеткодержатели, обеспечивающие лучшее прилегание щеток к коллектору при наличии вибраций и более компактную конструкцию щеточного узла, чем при радиальных щеткодержателях. Допустимость такой конструкции определяется преимущественным использованием одного направления вращения двигателя для движения электромобиля

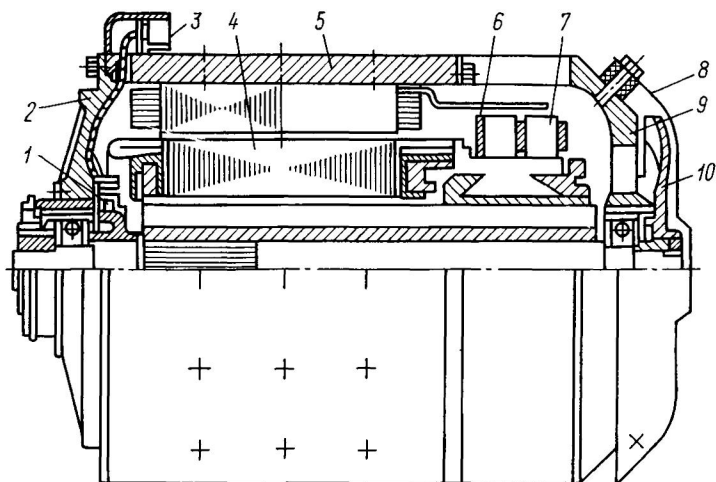


Рис. 3.9. Электродвигатель с независимым возбуждением типа ПТ-125:

1 — датчик частоты вращения; 2 — передний щит; 3 — выводной разъем датчика частоты вращения; 4 — якорь; 5 — станина; 6 — щеткодержатель; 7 — щетка; 8 — кожух вентилятора; 9 — задний щит; 10 — вентилятор охлаждения

вперед и пониженными требованиями по максимальным значениям скорости и момента при движении назад.

Общий вид электродвигателя ПТ-125 показан на рис. 3.9. Отметим, что двигатель имеет полый шлицевой вал для присоединения к редуктору через торсионный валик. Система охлаждения двигателя — аксиальная, с продувом воздуха через специальные охлаждающие каналы в якоре. Двигатель имеет встроенный датчик частоты вращения, обеспечивающий выходной сигнал с амплитудой не менее 6 В при частоте вращения 4000 мин^{-1} . На рис. 3.10 показаны типовые регулировочные характеристики машин такого исполнения для ряда значений относительного тока якоря i_a .

Заслуживает внимания опыт фирмы «Полейти и Оста», разработавшей тяговые двигатели для электромобилей с базовой высотой оси вращения 132 мм и исполнениями на напряжения 96 и 180 В,

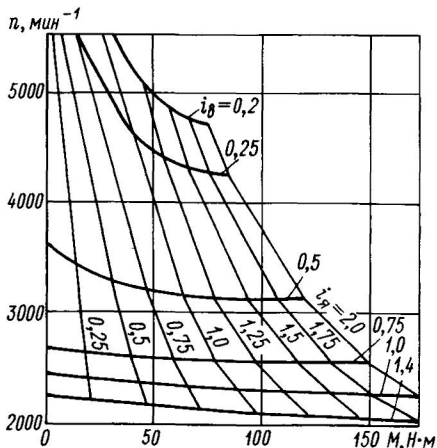


Рис. 3.10. Регулировочные характеристики двигателя с независимым возбуждением

которые отличаются по длине. При этом (как видно из данных табл. 3.6) достигнуто и изменение мощности в 2 раза.

Задачи конструктивной оптимизации двигателей электромобилей не являются в настоящее время однозначными из-за неопределенности характеристик серийноспособного источника тока. Имеются, в частности, по меньшей мере три показателя качества, которые должны быть взаимоувязаны весовыми коэффициентами, отражающими значимость этих показателей для электромобиля в целом. Такими показателями следует считать: стоимость или трудоемкость изготовления двигателя; массогабаритные показатели; потери энергии или средневзвешенный КПД в типовых режимах.

Сущность весовых коэффициентов можно пояснить на примере связи потерь энергии в двигателе ΔW_M и дополнительных затрат массы двигателя, позволяющих эту энергию сэкономить. В первом приближении связь между этими показателями дает выражение

$$\Delta W_M \approx K_{эм} \Delta G_M, \quad (3.16)$$

где коэффициент $K_{эм}$ определяется через удельную энергоемкость источника тока в том же режиме из неравенства

$$K_{эм} \geq q = \frac{W_B}{G_B}. \quad (3.17)$$

Неопределенность в интегральном критерии качества электродвигателя проявляется и в вопросе выбора числа главных полюсов. Из табл. 3.6 следует, что часть двигателей выполняется с числом полюсов, равным четырем, а другая часть — равным шести. Известно, что увеличение числа пар полюсов позволяет уменьшить массу и габаритные размеры двигателя, что следует также из упомянутой таблицы; однако при этом существенно увеличивается трудоемкость изготовления двигателя и (несмотря на экономию активных материалов) стоимость двигателя в целом. Практика показывает, что для электромобилей малой общей массы предпочтение отдается массогабаритным показателям, а для электромобилей средних классов — стоимостным.

При ограниченном напряжении питания основные меры по снижению потерь энергии связаны с увеличением массы и габаритных размеров двигателя; к этим мерам относятся: уменьшение сопротивления якорной цепи за счет увеличения массы меди якоря, уменьшение магнитных нагрузок путем увеличения массы стали и т. п. При низких значениях удельной энергоемкости батарей q эти меры представляются оправданными, что следует из выражения (3.17). Однако вряд ли можно считать правильной ориентацию на удельную энергоемкость порядка 20—30 Вт·ч/кг, а для более высоких удельных показателей источника тока принципиально необходимо искать новые пути конструктивной оптимизации двигателей.

Заметим попутно, что необходимость снижения потерь энергии в двигателе позволяет проще решать вопросы их охлаждения. По этой причине не получили развития работы по форсированным жидкостным системам охлаждения двигателей.

По вводимой в последние годы терминологии понятие «контроллер для электромобилей» объединяет преобразовательные устройства, аппаратуру управления и защиты, электронные устройства управления и другие узлы тягового электропривода. Аналогично обстоит дело и с конструктивным исполнением таких контроллеров, предусматривающих объединение в общем корпусе максимально возможного числа устройств. Это позволяет эффективно решать вопросы защиты от воздействий окружающей среды, рациональной установки аппаратуры управления на электромобиле, первичной наладки, диагностики и ремонтнообслуживания в процессе эксплуатации. Однако в общем корпусе обычно предусматривается блочное исполнение отдельных функциональных устройств.

Конструкция блока силового преобразователя, питающего якорную цепь двигателя, в значительной мере определяется конструктивным исполнением применяемых силовых элементов — тиристоров, транзисторов, контакторов и т. п., а также радиаторов для их охлаждения. Заметим, что применение разнородных систем охлаждения для электродвигателя и силового преобразователя является нерациональным из-за увеличения массы вспомогательных устройств и усложнения общей схемы теплообмена. По этой причине (несмотря на эффективность жидкостного охлаждения силового преобразователя) практическое применение находит почти исключительно воздушное охлаждение.

Для воздушного охлаждения можно выделить две конструктивные схемы блока преобразователя:

с единым базовым теплоотводящим элементом, имеющим ребренные поверхности для обдува; причем чаще всего — это внешние поверхности контроллера;

с набором индивидуальных радиаторов охлаждения отдельных силовых элементов; вторая конструктивная схема требует решения вопроса об организации теплоотвода от индивидуальных радиаторов наружу.

Конструктивная оптимизация силового преобразователя направлена, в первую очередь, на снижение его массы. В значительной степени она зависит от оптимизации схемной, которая имеет непосредственной целью снижение потерь энергии в преобразователе. Для тиристорных преобразователей основные возможности такой оптимизации связаны с ограничением энергии, циркулирующей в контуре искусственной коммутации. Для обеспечения надежного отключения силовых тиристоров при наиболее неблагоприятных условиях — пиковом токе нагрузки, максимальной температуре переходов, малом обратном напряжении и других — приходится увеличивать запас энергии в накопитель-

ных элементах контура коммутации. Однако в основных режимах работы, занимающих 95—97 % времени включенного состояния преобразователя, эта энергия оказывается избыточной. В связи с этим средневзвешенный КПД преобразователя может быть существенно повышен при снижении энергии контура коммутации, когда это допустимо по условиям работы. Для этого существуют, в принципе, два способа: отвод избыточной энергии из контура коммутации: ограничение притока энергии в контур коммутации.

Первый способ осуществляется созданием цепи сброса энергии в тяговую батарею: в схеме (рис. 3.3) это достигается, например, введением вторичной обмотки коммутационной индуктивности L_1 , замыкаемой через диод на батарею. Таким образом ограничивается максимальное напряжение коммутирующего конденсатора C , которое определяет запас энергии в контуре. Этот способ позволяет повысить средневзвешенный КПД на 15—20 %, а абсолютную величину потерь в наиболее показательном режиме понизить почти в два раза.

Однако более эффективным представляется второй способ снижения потерь энергии в контуре коммутации. Он основан на возможностях управляемого изменения структуры в вентильных преобразователях и реализует некоторые принципы, изложенные в работе [28]. Рассмотрим использование этих возможностей на примере ранее приведенной на рис. 3.3 схемы импульсного преобразователя. В табл. 3.4 было показано (согласно рис. 3.4) наличие двух интервалов перезаряда коммутирующего конденсатора C : $t_4 - t_5$ и $t_5 - t_6$. Эти интервалы времени определяются существованием двух различных контуров перезаряда; причем в первом интервале перезаряд происходит без притока энергии в контур, а во втором интервале конденсатор C подключается к тяговой батарее и от нее поступает добавочная энергия. Так как соотношение рассматриваемых временных интервалов полностью определяется опережением открытия тиристора V_4 по отношению к открытию тиристора V_1 , то, управляя этим опережением, можно изменять соотношение интервалов существования различных контуров перезаряда. Крайние случаи — это отсутствие интервала $t_5 - t_6$ с подпиткой контура от батареи и полное исключение интервала $t_4 - t_5$, т. е. максимальное использование подвода энергии от батареи. Для этих крайних случаев изменение потерь в преобразователе оказывается примерно четырехкратным во всем возможном интервале выходных напряжений работающего преобразователя.

Таким образом, изменение структуры контура коммутации позволяет достигнуть значительно большего эффекта (причем более простыми средствами, не требующими никаких усложнений схемы силовой части преобразователя). Достаточно лишь реализовать в системе управления преобразователем несложный алгоритм управления интервалом задержки включения основного

тиристора t_{45} в функции тока нагрузки и температуры основного тиристора, например, вида

$$t_{45} = t_5 - t_4 = \tau_0 - f(I_n, \vartheta). \quad (3.18)$$

Эта функция $f(I_n, \vartheta)$ может быть непрерывной или дискретной, но в любом случае — возрастающей, что обеспечит увеличение энергии контура коммутации при ухудшении условий коммутации.

3.4. АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ТЯГОВЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Нефтяные топлива как источник энергии обладают очень высокими удельными характеристиками: в частности, в 1 кг бензина содержится 11,6 кВт·ч энергии. Аккумуляторы любых возможных электрохимических систем имеют теоретический запас энергии примерно в 6—10 раз меньший. По этой причине вопросы рационального использования имеющейся на автомобиле энергии являются важнейшими для тяговых электрических систем любых типов.

Заметим, что электрические тяговые системы имеют гораздо меньшие потери энергии, чем системы с тепловыми двигателями, в том числе и с двигателями внутреннего сгорания. Коэффициент полезного действия существующих тепловых двигателей составляет 25—30 %, поэтому только около 3 кВт·ч/кг исходной удельной энергии топлива полезно используется на выходе двигателя.

Степень полезного использования энергии электрохимического аккумулятора (при современном состоянии техники) может быть гораздо выше, а достигнутый уровень КПД электродвигателей составляет 85—90 %. Таким образом, уровень полезно используемой удельной энергии электрохимических источников может достигнуть 25—30 % от приведенной выше величины на выходе теплового двигателя. Этот ориентировочный подсчет показывает, что, существенно проигрывая в исходной теоретической энергии энергоносителя, электрические тяговые системы могут отчасти компенсировать это при реализации имеющихся возможностей более эффективного ее использования. Это обстоятельство имеет важное значение для оценки перспектив развития электрических тяговых систем, а также для правильного подхода к их созданию.

В основу исследования энергетики тяговых систем положен метод баланса энергии. Из анализа конструкций и схем тяговых систем автомобилей, приведенных в предыдущих разделах, следует, что любая тяговая система состоит из следующих энергетических модулей, осуществляющих последовательное преобразование энергии: тяговой аккумуляторной батареи B , контроллера (устройства управления, включая и силовой преобразователь, если таковой имеется) K , тягового электродвигателя M , трансмиссии TP . Энергетическая диаграмма в общем виде показана

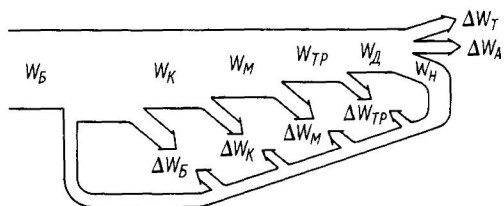


Рис. 3.11. Энергетическая диаграмма электромобиля

W_P — энергия рекуперации; ΔW_B , ΔW_K , ΔW_M , ΔW_{TP} — потери энергии в модулях тяговой системы — батарее, контроллере, электродвигателе, трансмиссии; ΔW_T , ΔW_A — составляющие потерь энергии при движении, затрачиваемые на трение качения и аэродинамические потери энергии соответственно.

Кроме того, на рис. 3.11 показаны: W_K , W_M , W_{TP} — энергия на входе соответствующих модулей тяговой системы; W_D — энергия, необходимая для движения; W_H — накопленная при движении энергия.

Верхняя ветвь энергетической диаграммы отображает режим движения электромобиля, при котором все составляющие расхода энергии покрываются за счет энергии батареи. Нижняя ветвь диаграммы условно показывает путь энергии и ее потери при возврате энергии в батарею. Чаще всего в каждый момент времени существует только одно из указанных двух направлений передачи энергии, что соответствует основным энергетическим режимам: потребления энергии батареей, который называем для краткости тяговым; возврата энергии в батарею, или иначе — рекуперации.

Кроме основных режимов, существует еще ряд энергетических режимов. Если энергия батареи не потребляется, т. е. $W_B = 0$ и возврат энергии также отсутствует, т. е. $W_P = 0$, то потери энергии при движении покрываются за счет накопленной энергии и вместо выражения (3.19) имеем

$$\Delta W_T + \Delta W_A = W_H. \quad (3.20)$$

Такой режим движения принято называть накатом.

Если к потерям энергии при движении добавить потери энергии в механических тормозах, отнеся их к потерям в трансмиссии при торможении $\Delta W'_{TP}$, то получим уравнение баланса энергии в режиме механического торможения

$$\Delta W_T + \Delta W_A + \Delta W'_{TP} = W_H. \quad (3.21)$$

Существуют еще два известных режима электрического торможения, при которых накопленная при движении энергия не возвращается в ее источник. В режиме динамического торможения

на рис. 3.11. Эта диаграмма иллюстрирует следующее уравнение баланса энергии:

$$W_B + W_P = \Delta W_B + \Delta W_K + \Delta W_M + \Delta W_{TP} + \Delta W_T + \Delta W_A, \quad (3.19)$$

где W_B — энергия аккумулятора;

W_P — энергия рекуперации; ΔW_B , ΔW_K , ΔW_M , ΔW_{TP} — потери энергии в модулях тяговой системы — батарее, контроллере, электродвигателе, трансмиссии; ΔW_T , ΔW_A — составляющие потерь энергии при движении, затрачиваемые на трение качения и аэродинамические потери энергии соответственно.

Кроме того, на рис. 3.11 показаны: W_K , W_M , W_{TP} — энергия на входе соответствующих модулей тяговой системы; W_D — энергия, необходимая для движения; W_H — накопленная при движении энергия.

Верхняя ветвь энергетической диаграммы отображает режим движения электромобиля, при котором все составляющие расхода энергии покрываются за счет энергии батареи. Нижняя ветвь диаграммы условно показывает путь энергии и ее потери при возврате энергии в батарею. Чаще всего в каждый момент времени существует только одно из указанных двух направлений передачи энергии, что соответствует основным энергетическим режимам: потребления энергии батареей, который называем для краткости тяговым; возврата энергии в батарею, или иначе — рекуперации.

Кроме основных режимов, существует еще ряд энергетических режимов. Если энергия батареи не потребляется, т. е. $W_B = 0$ и возврат энергии также отсутствует, т. е. $W_P = 0$, то потери энергии при движении покрываются за счет накопленной энергии и вместо выражения (3.19) имеем

$$\Delta W_T + \Delta W_A = W_H. \quad (3.20)$$

Такой режим движения принято называть накатом.

Если к потерям энергии при движении добавить потери энергии в механических тормозах, отнеся их к потерям в трансмиссии при торможении $\Delta W'_{TP}$, то получим уравнение баланса энергии в режиме механического торможения

$$\Delta W_T + \Delta W_A + \Delta W'_{TP} = W_H. \quad (3.21)$$

Существуют еще два известных режима электрического торможения, при которых накопленная при движении энергия не возвращается в ее источник. В режиме динамического торможения

энергия от батареи не потребляется и уравнение баланса имеет вид

$$\Delta W_T + \Delta W_A + \Delta W_{TP} + \Delta W_M + \Delta W_E = W_H. \quad (3.22)$$

В режиме торможения противовключением дополнительно потребляется энергия от батареи

$$\Delta W_T + \Delta W_A + \Delta W_{TP} + \Delta W_M + \Delta W_K + \Delta W_B = W_B + W_H. \quad (3.23)$$

Хотя в настоящее время стремятся заменить режим торможения противовключением одним из более экономичных тормозных режимов, т. е. не связанных с отбором энергии из батареи, тем не менее в определенных специфических формах он может реально существовать. Например, в схемах тягового электропривода с тиристорными импульсными преобразователями (рис. 3.3) от батареи может потребляться энергия, необходимая для коммутации тиристоров. Кроме того, от батареи также потребляется энергия, которая нужна для возбуждения двигателя, питания системы управления (контроллера) и т. п.

Заметим, что уравнения баланса энергии являются интегральными, т. е. в них рассматриваются процессы обмена энергией за какой-то промежуток времени или пути электромобиля. В связи с этим отбор энергии батареи на возбуждения тягового двигателя, питание системы управления и на прочие вспомогательные нужды может в среднем компенсироваться за счет других составляющих. Это позволяет не рассматривать без необходимости режим торможения противовключением.

Кроме баланса энергии принято в ряде случаев рассматривать уравнения баланса мощности, который является первичным по отношению к балансу энергии. Однако условия эксплуатации городского транспорта характеризуются циклическими изменениями режимов движения транспортных средств. В связи с этим практически большую ценность представляет баланс энергии, составляемый для определенного расчетного цикла движения. Описание стандартизованных циклов движения электромобилей приводится ниже.

Наиболее применяемым для городских электромобилей в настоящее время является стандартный испытательный цикл SAEj 227, а «С» или близкий к нему 500-метровый цикл НАМИ. Поэтому сравнение характеристик тяговых систем и их анализ целесообразно проводить именно для этого цикла, который для краткости в дальнейшем будем называть просто циклом «С». Для цикловых расчетов уравнение баланса энергии дает значительно больше информации, чем уравнение баланса мощности; кроме того весьма важным показателем для сравнения различных электромобилей является удельный расход энергии за цикл, в частности для цикла «С» имеем

$$\omega_c = \frac{W_B}{GL_C}, \quad (3.24)$$

где G — полная масса электромобиля, т; L_c — пробег за цикл движения, км; W_B — потребление энергии от батареи за цикл, Вт·ч.

Рассмотрим составляющие баланса мощности и баланса энергии.

Мощность, соответствующая потерям энергии на трение качения ΔW_T , обычно определяется в виде

$$P_T = Gfv, \quad (3.25)$$

где v — скорость движения, м/с; f — коэффициент сопротивления качению, который при скоростях движения меньше 60—80 км/ч можно считать постоянным и равным для дорог с асфальтовым покрытием 0,012—0,018.

Мощность, соответствующая аэродинамическим потерям энергии ΔW_A при движении, определяется по формуле

$$P_A = k_B F_B v^3, \quad (3.26)$$

где k_B — коэффициент обтекаемости, Н·с²/м⁴; F_B — лобовая площадь транспортного средства, м².

Заметим, что при наличии ветра попутная составляющая его изменяет величину аэродинамических потерь согласно выражению

$$P_A = k_B F_B (v \pm v_B)^3.$$

Мощность, идущая на накопление кинетической энергии электромобиля, определяется в виде

$$P_K = \pm \frac{G}{g} \delta jv, \quad (3.27)$$

где δ — коэффициент учета вращающихся масс (определяется путем приведения к скорости поступательного движения); j — ускорение (или замедление) электромобиля.

Изменение потенциальной энергии, запасаемой при движении электромобиля на подъем, часто не учитывается, или учитывается только в виде потерь энергии при движении на подъем. Однако для циклических режимов и внутригородских замкнутых маршрутов мощность, затрачиваемая при движении на подъем, на уклоне будет движущей, т. е.

$$P_H'' = \pm Gv \sin \alpha, \quad (3.28)$$

где α — угол подъема.

Потери энергии в тяговой системе за расчетный цикл «С» отличаются для разных типов тяговых систем и являются, таким образом, характеристикой энергетического качества тяговой системы. Методы расчета потерь в электродвигателях, устройствах управления (в частности, в статических преобразователях, аккумуляторных батареях и элементах трансмиссии) изложены в специальной технической литературе достаточно подробно. В связи

с этим ограничимся рассмотрением только результатов расчетов для некоторых типов тяговых систем данных испытаний электромобилей с различными тяговыми системами и общим анализом энергетических характеристик.

Сводные экспериментальные характеристики удельных потерь при движении по циклу «С», полученные выборкой из наиболее достоверных результатов испытаний электромобилей различных типов, приведены в табл. 3.7. Эта таблица дает сравнительное представление об энергетических качествах различных электромобилей в целом. Однако обращает на себя внимание такое обстоятельство: удельные потери энергии при цикловом движении имеют гораздо больший разброс, чем приводимые в таблице данные по удельному расходу энергии в режиме постоянной скорости движения 40 км/ч (w_{40}). Даже если считать, что экспериментальное определение запаса хода для циклового режима сопряжено с большими погрешностями, чем для режима постоянной скорости (из-за более сложной методики и техники испытаний), то и в этом случае различия в удельных показателях имеют объективные основания. Анализ этого различия представляет интерес с точки зрения совершенствования тяговых систем и их элементов.

Очевидно, что для уменьшения удельного расхода энергии на движение необходимо тщательное изучение всех компонентов конструкции электромобиля, в том числе определяющих аэродинамическое сопротивление, сопротивление качению и др. Однако для выявления путей совершенствования тяговых систем целесообразно остановиться на таких вопросах, как относительные возможности электрического рекуперативного торможения, а также сравнительная роль отдельных агрегатов тяговой системы в общем расходе энергии.

Для этого предварительно определим составляющие расхода энергии по циклу «С», которые, в принципе, не зависят от тяговой системы.

Такой составляющей является прежде всего кинетическая энергия W'_k согласно выражению (3.27). Далее к числу таких составляющих можно отнести энергию движения при установившейся скорости

$$W'_d = \Delta W_T + \Delta W_A = (P_T + P_A)t_{cr}, \quad (3.29)$$

а также при движении канатом

$$W'_{д. в} = \int_0^{t_{co}} (P_T + P_A) dt. \quad (3.30)$$

Здесь и далее временные интервалы обозначены в соответствии с принятыми для стандартного цикла.

Энергия, затрачиваемая на движение экипажа при разгоне и торможении, зависит от характера изменения скорости $v =$

Характеристики удельных потерь электромобиля при движении по циклам «С» и НАМИ

Характеристика	Модель электромобиля							
	УАЗ-3801	РАФ-2910	ЕрАЗ-3734	НАМИ-0189Э	ВАЗ-21029	ВАЗ-2702		
Полная масса, т	3,0	3,0	3,0	2,6	1,62	1,66		
Тип батареи	12×6ЭМ-60	10× ×6ЭМ-145	10× ×6ЭМ-145	32×6Р-230	90НЦ-125	84НЦ-125		
Напряжение батарей, В	144	120	120	120	144	134		
Тип двигателя, фирма-разработчик	ДНВ, ВАЗ	ДНВ, РЭЗ	ДНВ, РЭЗ	ДНВ, НАМИ	ДСМВ, ВАЗ	ДНВ, ВАЗ		
$\omega_{С}, \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \text{км}}$	106,3	146 *	106 *	108 *	192	115		
$\omega_{40}, \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \text{км}}$	84	77,6	68	—	79	77,6		
Характеристика	Модель электромобиля							
	900E/E2	VEV	EVA, EF-100	SCT	EVW	ETV-1	SCT-2	EV3P
Полная масса, т	1,87	3,0	2,3	1,8		1,63	—	1,54
Тип батареи	—	EP1	EP1	EP1	EP1	EP1	EP1	—
Напряжение батарей, В	96	н-ж 125	н-ж 120	св-к 108	н-ж 96	н-ж 120	н-ж —	св-к 120
Тип двигателя, фирма-разработчик	ДНВ, «Полетти»	ДНВ, «Сименс»	ДНВ, «Дженерал электрик»	ДНВ, «Сименс»		ДНВ, «Дженерал электрик»	—	—
$\omega_{С}, \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \text{км}}$	95	156	128	152	129	130	148	140
$\omega_{40}, \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \text{км}}$	—	—	—	—	—	67,2	75,7	87,6
По циклу НАМИ.								
Примечание. В таблице приведены обозначения: н-ж — никель-железная; св-к — свинцово-кислотная.								

$= v(t)$ на этих интервалах. Будем пока считать, что закон изменения скорости в цикле — линейный.

Затраты энергии на движение при разгоне

$$W'_{д. P} = \int_0^a (P_T + P_A) dt; \quad (3.31)$$

при торможении

$$W'_{д. T} = \int_0^{t_b} (P_T + P_A) dt. \quad (3.32)$$

Очевидно, что для каждого электромобиля может быть определена величина расхода энергии на движение за цикл «С» по формуле

$$W'_C = W'_{д. B} + W'_{д. P} + W'_{д. T}. \quad (3.33)$$

Эта сумма представляет некоторую оценку предельных для данного электромобиля затрат энергии при полном использовании (рекуперации) накопленной (кинетической) энергии. Соответственно можно определить удельные затраты энергии

$$w'_C = W'_C / (GL_C). \quad (3.34)$$

Для сопоставления определим затраты энергии на движение без рекуперации, однако учтем при этом, что движение накатом совершается за счет запаса кинетической энергии. В этом случае

$$W''_C = W'_C + W''_H - W'_{д. B} \quad (3.35)$$

и удельные затраты энергии

$$w''_C = W''_C / (GL_C). \quad (3.36)$$

Имея данные из выражений (3.34) и (3.36), можно определить значение рекуперации энергии для данного электромобиля, а сравнивая эти величины с показателями удельного расхода энергии для электромобиля в целом, например из табл. 3.7, найти относительное качество тяговой системы.

В качестве примера, имеющего и самостоятельное значение, ниже приведены данные по расчетным значениям расхода энергии на движение для электромобиля УАЗ.

Затраты энергии, Вт·ч:

W'_H	74,1
$W'_{д. B}$	47,9
$W'_{д. P}$	17,1
$W'_{д. T}$	6,8
$W'_{д. B}$	16,0
W'_C	87,8
W''_C	145,9

Удельный расход, Вт·ч/(т·км):

w'_c	54,5
w''_c	90,6

Из приведенных выше данных следует, что накопленная электроэнергией кинетическая энергия при движении по циклу «С» достаточно велика и соизмерима с расходом энергии на движение. Это означает, что использование энергии за счет принятия ряда специальных мер по ее рекуперации, в том числе требующих дополнительных затрат, имеет по меньшей мере энергетическое обоснование. Экономическое обоснование этих затрат также возможно, но требует дополнительных характеристик тяговой батареи.

Рассмотрим на примере того же автомобиля УАЗ с электроприводом, выполненным по схеме, приведенной на рис. 3.3, т. е. с двигателем независимого возбуждения и двухзонным регулированием, распределение потерь в тяговой системе. Для определенности в качестве тяговой рассматривается батарея типа 12×6ЭМ60, свинцово-кислотная, емкостью 60 А·ч, на напряжение 144 В. Распределение потерь энергии в агрегатах тяговой системы при движении с постоянной скоростью 40 км/ч приведено в табл. 3.8.

Из этой таблицы следует, что основная составляющая потерь приходится на электродвигатель, а следующие по величине потери энергии возникают в трансмиссии. Однако только по распределению потерь в установившемся режиме еще нельзя делать выводы о качестве тяговой системы в данном варианте и возможностях улучшения отдельных модулей или энергосистемы в целом.

Рассмотрим распределение потерь по модулям тяговой системы при движении по циклу «С» в сравнении с установившимся режимом движения; причем для наглядности будем сопоставлять величины удельных потерь, т. е. потерь, отнесенных к полной массе автомобиля

$$w_1 = \Delta W_1 / (GL_c). \quad (3.37)$$

Результаты этих расчетов, а также относительная величина удельных потерь $w_i/w_{т.с}$ в процентах приведены в табл. 3.9.

Таблица 3.8

Распределение потерь при движении автомобиля УАЗ с постоянной скоростью

Модуль	P , кВт	ΔP , кВт	η , %
Батарея	12,095	0,211	0,983
Контроллер	11,884	0,152	0,987
Двигатель	11,732	1,841	0,843
Трансмиссия	9,891	0,650	0,930
Тяговая система в целом	9,241	2,854	0,764

Удельные потери при движении по циклу «С» и с постоянной скоростью

Режим движения	Составляющие потерь, $\frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}/(\text{т} \cdot \text{км})}{\%}$							
	w_B	w_K	w_M	w_{TP}	$w_{T.C}$	w'_C	w''_C	w_C
40 км/ч	$\frac{1,5}{7,5}$	$\frac{1,1}{5,6}$	$\frac{12,8}{64,6}$	$\frac{4,5}{22,7}$	$\frac{19,8}{100}$	—	64,2	84,0
Цикл «С»	$\frac{6,2}{13,2}$	$\frac{6,1}{13,1}$	$\frac{25,7}{55,0}$	$\frac{8,7}{18,6}$	$\frac{46,7}{100}$	54,5	90,6	106,3

Из таблицы следует, что основная доля потерь в тяговой системе рассматриваемого типа относится к электродвигателю. Для конструктивно оптимизированного, а по используемым алгоритмам управления — близкого к оптимальному исполнению контроллера потери энергии сравнительно невелики, в том числе и для движения по циклу. При скорости движения 40 км/ч силовой преобразователь в цепи якоря находится в состоянии насыщения, и потери в нем составляют всего 152 Вт. Можно отметить довольно большую величину потерь энергии в трансмиссии, что обычно не привлекает внимания конструкторов электромобилей. В связи с этим обстоятельством требуется дополнительное изучение вопросов применения переключаемых передач, так как в таких передачах возможны еще более заметные потери энергии.

Для дальнейшего анализа табл. 3.9 дополнена данными из табл. 3.7 и на стр. 119. Из этих сводных данных видно, что затраты энергии при постоянной скорости 40 км/ч, равные 84 Вт·ч/т·км, в основном определяются расходом энергии на сопротивление движению электромобиля, коэффициент полезного действия тяговой системы при этом оказывается достаточно высоким и равным 0,764. Для движения по циклу (в данном случае по циклу «С») КПД тяговой системы можно определить обычным образом, но не переходя к величинам абсолютных расходов энергии:

$$\eta_{T.C} = \frac{w_C - w_{T.C}}{w_C} = \frac{106,3 - 46,7}{106,3} = 0,561.$$

Заметим, однако, что в суммарном расходе энергии w имеется определенная часть потерянного запаса кинетической энергии. Степень полезного использования кинетической энергии путем ее рекуперации можно оценить, если учесть предельные показатели

w'_c и w''_c . Удельный расход энергии w_c находится внутри промежутка следующего вида:

$$w'_c + w_{т.с} < w_c \leq w''_c + w_{т.с}, \quad (3.38)$$

т. е. ограниченного предельным использованием кинетической энергии и потерями без рекуперации.

Введем коэффициент использования кинетической энергии по следующей формуле:

$$k = \frac{w''_c + w_{т.с} - w_c}{w'_c + w_{т.с} - (w'_c + w_{т.с})}. \quad (3.39)$$

При изменении w_c в пределах интервала (3.38) этот коэффициент будет изменяться от нуля при отсутствии рекуперации, что соответствует верхней границе интервала (3.38), до единицы при предельном использовании кинетической энергии. Разумеется, что второй случай не может быть достигнут в реальных системах и должен также рассматриваться как предел для выражения (3.39).

Вместо формулы (3.39) может использоваться более простое эквивалентное выражение

$$k_{и} = \frac{w''_c + w_{т.с} - w_c}{w''_c - w'_c}. \quad (3.40)$$

Для рассматриваемого примера автомобиля УАЗ имеем

$$k_{и} = \frac{46,7 + 90,6 - 106,3}{90,6 - 54,5} = 0,85.$$

что можно считать достаточно высоким значением.

3.5. СТАТИЧЕСКАЯ И ДИНАМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТЯГОВОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

В предыдущем параграфе уже затрагивался вопрос о целесообразности режима постоянного ускорения на этапе разгона по типовому циклу движения. Можно достаточно просто показать, что потери энергии в таком режиме будут заметно больше, чем при некоторых других законах изменения скорости при разгоне автомобиля. Ранее также рассматривались вопросы конструктивной и схемной оптимизации электродвигателей и силовых преобразователей. Исходя из этого, целесообразно разделить общую задачу оптимизации тяговой системы автомобиля на три уровня, а именно:

- 1) конструктивной оптимизации агрегатов;
- 2) оптимизации управления электродвигателем и силовым преобразователем;
- 3) оптимального управления движением автомобиля.

Основанием для разделения второго и третьего уровней является тот факт, что в большинстве современных тяговых систем

имеется определенная избыточность в управляющих возможностях, или, если говорить точнее, то в управляющих переменных. В частности, для электродвигателя постоянного тока управление моментом на валу или скоростью при регулировании в зоне ниже номинальной частоты вращения, может осуществляться с помощью следующих переменных:

1) напряжения на якоре, которое, в свою очередь, может изменяться за счет:

а) скважности импульсного силового преобразователя при постоянной или переменной частоте коммутации;

б) переключения секций тяговой батареи с последующим импульсным регулированием;

в) переключения секций тяговой батареи с последующим переключением дополнительных резисторов в цепи якоря;

2) тока возбуждения двигателя.

Независимо от выбора какого-либо из перечисленных методов управления может быть сформирован практически любой физически возможный закон движения электромобиля в целом, так как управляемые на втором уровне динамические процессы (электромагнитные) протекают гораздо быстрее, чем меняется скорость движения электромобиля. На этом основании для тяговых систем оказывается допустимым и весьма полезным принцип разделения процессов (или движений) на «медленные» — движение самого электромобиля — и «быстрые» — изменения электромагнитных переменных.

По отношению к электромобилю в целом будем называть оптимизацию «быстрых» процессов статической, считая, что при протекании этих процессов состояние электромобиля не меняется, или является статическим. Оптимизацию «медленных» движений будем называть динамической.

В ряде работ по статической оптимизации показано, что минимум потерь достигается при одновременном изменении скважности и частоты силового импульсного преобразователя. Наиболее точное решение задачи статической оптимизации тяговой системы с двигателем независимого возбуждения принадлежит Ю. Н. Чеховому [29]. Им получена следующая зависимость для оптимальной частоты коммутации преобразователя:

$$f_0 = \sqrt[3]{\frac{I_0^2 \gamma^2 (1 - \gamma)^2 R(\gamma)}{6Q_K [\gamma \tau_2 + (1 - \gamma) \tau_1]^2}}, \quad (3.41)$$

где I_0 определяется выражением

$$I_0 = \frac{E_B - E_D}{R_1 - R'} + \frac{E_D}{R_2 - R'};$$

E_B , E_D — ЭДС тяговой батареи и двигателя соответственно; R_1 , R_2 , τ_1 , τ_2 — суммарные сопротивления и постоянные времени для активного, т. е. связанного с подводом энергии от батареи,

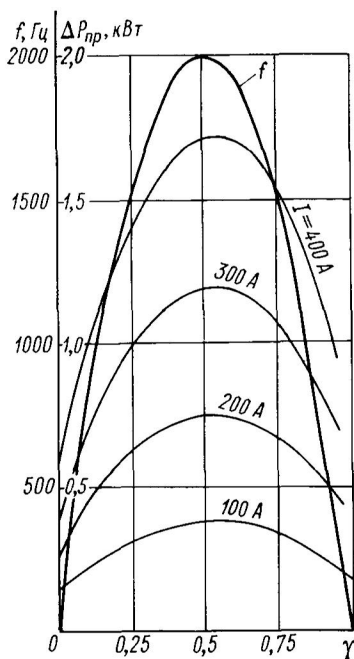


Рис. 3.12. Зависимость частоты от скважности и потери энергии в транзисторном преобразователе ETV-1

Зависимости частоты от скважности, принятые в системе управления электромобиля ETV-1 «Дженерал электрик — Крайслер» с транзисторным силовым преобразователем, приведенным на рис. 3.5. Эти зависимости достаточно близки к рекомендованным для тиристорных преобразователей в [28, 29].

Путем простых преобразований величина дополнительных потерь энергии от пульсации выхода преобразователя может быть представлена в виде

$$\Delta P_f = R(\gamma) \frac{(2A)^2}{12} + Q_{\text{н}} f, \quad (3.43)$$

где $2A$ — размах пульсаций тока якоря двигателя, определяемый по формуле

$$2A = \frac{E_{\text{Б}} - (R_1 - R_2) I}{L_f} \gamma (1 - \gamma). \quad (3.44)$$

Выражения (3.43) и (3.44) показывают, что экстремальный характер соотношения ΔP_f определяется квадратично-гиперболической, т. е. резко убывающей вначале, зависимостью первого слагаемого от частоты и линейно возрастающей зависимостью

и пассивного интервалов периода коммутации; $Q_{\text{н}}$ — коммутационные потери энергии в преобразователе; γ — относительная длительность (скважность) импульсов на выходе силового преобразователя; $R(\gamma)$ — параметр рассеяния энергии в двигателе, преобразователе и батарее; причем

$$R(\gamma) = \gamma R_1 + (1 - \gamma) R_2 + \Delta P_{\text{ст. м}}, \quad (3.42)$$

где $\Delta P_{\text{ст. м}}$ — потери в стали двигателя.

Из выражения (3.41), а также менее общих выражений подобного типа следует, что частота коммутации должна изменяться в функции скважности с целью минимизации дополнительных потерь от пульсации выходных переменных преобразователя. Эта конкретная зависимость для разных вариантов тяговой системы может несколько видоизменяться, однако она имеет общий характер для импульсных систем. В подтверждение отмеченного на рис. 3.12 приведены зависимости частоты от скважности, принятые в системе управления электромобиля ETV-1 «Дженерал электрик — Крайслер» с транзисторным силовым преобразователем, приведенным на рис. 3.5. Эти зависимости достаточно близки к рекомендованным для тиристорных преобразователей в [28, 29].

от частоты второго слагаемого. Эта резко убывающая зависимость от частоты дополнительных пульсационных потерь проявляется через пульсации тока $2A$. Так как пульсации тока якоря могут быть непосредственно измерены, то вместо управления частотой применим более простой алгоритм стабилизации пульсаций тока якоря на уровне, соответствующем минимуму потерь, согласно выражению (3.43). Управление такого рода использовалось в тяговых системах и ранее под названием «двухпозиционного», или релейного.

В соответствии с современными представлениями системы управления такого рода относятся к классу систем с переменной структурой СПС [28, 43], а режим переключений — к «скользящим» режимам. При таком управлении частота и скважность как управляемые переменные не выступают в явном виде, а задаются фактически через среднее значение и размах пульсаций (называемый для краткости «трубкой») выходной переменной. В данном случае говорится о среднем значении и трубке тока якоря двигателя.

Управление током (поток) возбуждения двигателя также может быть использовано на уровне статической оптимизации. Выражение для суммарных потерь энергии в двигателе может быть представлено как функция тока возбуждения I_B и выходных переменных ω и M , т. е.

$$\Delta P_M = \frac{R}{c^2} \frac{M^2}{\Phi^2(I_B)} + R_B I_B^2 + \frac{kM}{\Phi(I_B)} + k_1 \omega^2 + k_2 \omega^2 + k_3 \omega^B I_B^2. \quad (3.45)$$

На основании этого выражения для каждой пары значений ω и M , т. е. для каждого режима работы двигателя, может быть определено оптимальное минимизирующее значение тока возбуждения. Общий характер получаемой зависимости $I_B = \varphi(\omega, M)$ таков, что при снижении момента на валу ток возбуждения также должен уменьшаться. Управление, реализованное на основе такого алгоритма, иногда называют квазисериесным из-за некоторого сходства с характеристиками двигателя последовательного возбуждения. Однако существенное отличие состоит в зависимости I_B от частоты вращения ω , которой сериесная характеристика не обладает.

Задача динамической оптимизации значительно сложнее статической; причем это обусловлено в определенной степени разницей в формулировке задачи. Не говоря о том, что дорожная обстановка может требовать от водителя далеко не оптимальных по энергетике действий, можно выделить две различные постановки задачи. Первая из них рассматривалась Ф. Ди Мажо и может быть определена как оптимизация по критерию расхода энергии на движение

$$W = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \Delta P(v, \dot{v}, t) dt, \quad k = 1, 2, \dots \quad (3.46)$$

при заданном между остановками пути L_0 , т. е. при ограничении

$$\int_{t_{k-1}}^{t_k} v(t) dt = L_0, \quad (3.47)$$

где t_k, t_{k-1} — моменты остановки.

Однако при такой постановке задачи, которая вполне правомерна для городского транспорта типа автобусов или троллейбусов, теряется как база для сравнения стандартный цикл движения (в частности, *SAE j 227 a*, или цикл НАМИ). Кроме того, возможна ситуация, когда электромобиль, движущийся по оптимальному закону $V^0(t)$, не будет «вписываться» в поток уличного движения, а именно это и имеется в виду в стандартных циклах.

Поэтому вторая постановка задачи динамической оптимизации заключается в минимизации расхода энергии на участках разгона или торможения стандартных циклов, т. е. критерий (3.46) рассматривается при ограничении

$$\int_{t_{k-1}}^{t_k} \dot{v}(t) dt = v_k, \quad (3.48)$$

где v_k — заданная по циклу скорость в конечный момент времени t_k ; одновременно циклом задается соответствующая начальная скорость в момент времени t_{k-1} .

При такой постановке задачи пробег за цикл, вообще говоря, не остается постоянным, поэтому для сравнения различных диаграмм движения необходимо использовать показатели удельного расхода энергии за такие «квазистандартные» циклы W^0 .

Не останавливаясь на методе Ф. Ди Мажо решения первой задачи, отметим, что получаемая оптимальная диаграмма скорости $v^0(t)$, показанная

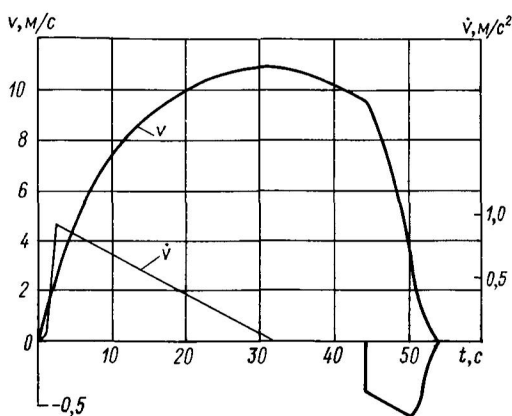


Рис. 3.13. Оптимальные диаграммы движения при ограничении на интервал между остановками

на рис. 3.13, характеризуется следующими особенностями: диаграмма фактически не имеет участков постоянной скорости; на основных участках движения производная ускорения отрицательна, т. е. после начального скачка ускорение убывает.

При точном аналитическом решении оптимизационной задачи во второй постановке встречаются значительные трудности. Числен-

ные же расчеты показывают, что характер экстремума достаточно пологий, т. е. разница по получаемым удельным потерям для диаграмм скорости, близких к оптимальной, сравнительно невелика. Это показывают и приводимые далее примеры.

В связи с этим предлагается простой метод построения близкой к оптимальной, т. е. «квазиоптимальной» диаграммы скорости. В основе его лежат следующие предположения о подходе к «квазиоптимальной» диаграмме: эта диаграмма может быть разделена на участке разгона на две части; первая часть участка разгона характеризуется постоянством ускорения, т. е. примерно линейным нарастанием мощности движения; на втором участке суммарная расходуемая мощность должна быть примерно постоянной; основные составляющие расхода энергии могут быть на участке постоянства мощности аппроксимированы зависимостью

$$\Delta P = \frac{\rho}{e^2} v^2 (\beta v + \gamma \dot{v})^2 + \frac{\gamma}{\eta_{\text{тр}}} (\beta v + \gamma \dot{v}), \quad (3.49)$$

где ρ — параметр, определяемый суммарным сопротивлением якорной цепи двигателя; e — параметр, определяемый противоЭДС двигателя; β — параметр, характеризуемый зависимостью потерь энергии от скорости; γ — приведенная масса движущихся частей.

Заметим, что выражение (3.49) заменяет кубичную зависимость аэродинамических потерь квадратичной; это основано на ограниченности максимальной скорости движения в цикле величиной 48—50 км/ч; кроме того, не учитываются некоторые виды потерь в двигателе и преобразователе. Первое слагаемое в выражении (3.49) отражает потери в меди двигателя и потери в активных сопротивлениях других элементов якорной цепи. Второе слагаемое отражает затраты энергии на движение электромобиля и учитывает КПД трансмиссии $\eta_{\text{тр}}$.

Постоянство потерь, согласно выражению (3.49), достигается при постоянстве выражения

$$\beta v^2 + \gamma \dot{v} v = P = \text{const}, \quad (3.50)$$

что позволяет записать уравнение движения в виде

$$\frac{\gamma}{2} \frac{dy}{dt} + \beta y = P, \quad (3.51)$$

где $y = v^2$.

Постоянная P определяется граничными условиями в начале интервала постоянства мощности по формуле

$$P = \beta v_{\text{гр}}^2 + \gamma v_{\text{гр}} \dot{v}_0, \quad (3.52)$$

где $v_{\text{гр}}$ — скорость в граничный момент времени t_1 ; \dot{v}_0 — начальное ускорение; $\dot{v}_0 = \text{const}$, следовательно,

$$v_{\text{гр}} = \dot{v}_0 t_1. \quad (3.53)$$

Определяя постоянную интегрирования дифференциального уравнения (3.51) также из начальных условий, получаем после простых преобразований

$$v = v_{гр} \sqrt{1 + \frac{\gamma}{\beta t_1} \left(1 - \exp\left(-\frac{2\beta}{\gamma}(t - t_1)\right)\right)}. \quad (3.54)$$

Для определения одного из двух неизвестных параметров выражения (3.54) может быть использовано второе граничное условие, задаваемое циклом движения

$$v(t_p) = v_k. \quad (3.55)$$

В системах двухзонного управления электродвигателем независимого возбуждения естественно определить скорость $v_{гр}$, исходя из напряжения источника питания и максимального потока возбуждения двигателя, по формуле

$$v_{гр} = \frac{U_B - I_n R_{я}}{c' \Phi_m}, \quad (3.56)$$

или непосредственно из характеристик электродвигателя.

Тогда граничный момент времени t_1 определяется решением трансцендентного уравнения

$$\left(\frac{v_k}{v_{гр}}\right)^2 - 1 = \frac{\gamma}{\beta t_1} \left(1 - \exp\left(-\frac{2\beta}{\gamma}(t_p - t_1)\right)\right). \quad (3.57)$$

Таким образом, «квазиоптимальная» диаграмма движения имеет вид:

$$v = \begin{cases} \dot{v}_0 t, & 0 < t \leq t_1; \\ v_{гр} \sqrt{1 + \frac{\gamma}{\beta t_1} \left(1 - \exp\left(-\frac{2\beta}{\gamma}(t - t_1)\right)\right)}, & t_1 < t \leq t_p. \end{cases} \quad (3.58)$$

Для электромобиля типа УАЗ с электродвигателем ПТ-146 в соответствии с приведенной методикой имеем:

$$\gamma = 3,05 \text{ т}; \quad \beta = 0,068 \text{ кВт} \cdot \text{с}^2/\text{м}^2; \quad v_{гр} = 6,666 \text{ м/с};$$

$$v_k = 13,333 \text{ м/с}; \quad t_1 = 6,144 \text{ с}; \quad \dot{v}_0 = 1,085 \text{ м/с}^2$$

и «квазиоптимальная» диаграмма скорости выражается в виде

$$v = \begin{cases} 1,085t, & 0 < t \leq 6,144; \\ 6,666 \sqrt{1 + 7,324(1 - \exp(-0,044t + 0,273))}, & 6,144 < t \leq 18. \end{cases}$$

На рис. 3.14 приведена полученная «квазиоптимальная» диаграмма скорости, т. е. кривая 2, а также кривая ускорения для нее 2' и, кроме того, для сравнения — линейная диаграмма разгона, т. е. кривая 1 и 1', а также диаграмма 3 с монотонно убывающим ускорением — кривая 3'.

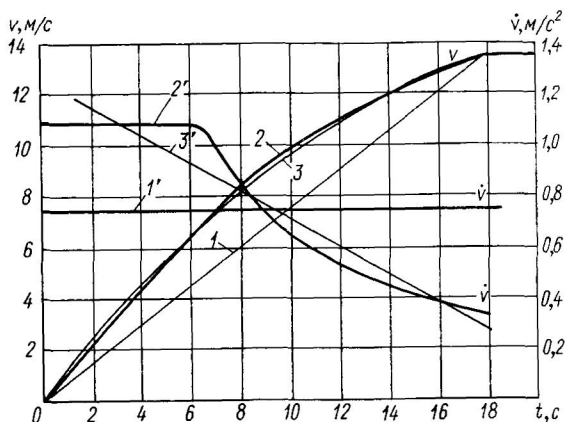


Рис. 3.14. Варианты диаграмм разгона по циклу «С»

На рис. 3.15 показаны диаграммы тока якоря двигателя $I_{я}$ для кривых 1—3 соответственно, а также рассчитанные на ЭВМ зависимости мощности на валу двигателя P_M и мощности на выходе батареи P_B для тех же скоростных диаграмм. Отметим прежде всего, что ток якоря двигателя для случая линейного разгона достигает значения $I_{я} = 447$ А при мощности на выходе тяговой батареи $P_B = 55,7$ кВт. Так как реальной батарее для автомобиля типа УАЗ с такой мощностью в настоящее время не существует, да и в дальнейшем необходимость в такой батарее сомнительна, то при последующем сравнении характеристики батарей из рассмотрения исключены. Рекуперация энергии в батарею при сравнении не учитывается, а все участки цикла, кроме разгона, принимаются одинаковыми.

Результаты сравнения приведены в табл. 3.10. Определяющим параметром таблицы является последний — удельные затраты энергии. Можно отметить близость результатов, полученных для кривых 2 и 3, которая находится в пределах точности расчетов. Учитывая простоту реализации, можно

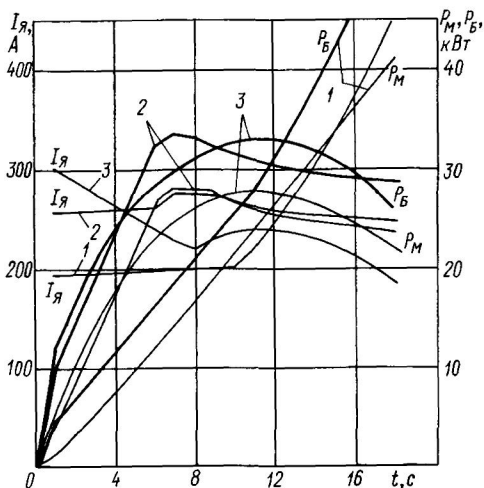


Рис. 3.15. Диаграммы тока якоря $I_{я}$, мощности двигателя P_M и батареи P_B для различных траекторий разгона

Энергетические показатели для различных диаграмм разгона

Параметр сравнения	Тип диаграммы скорости		
	Линейная	«Квазиоптимальная»	Кривая 3
Путь при разгоне, м	120,0	150,1	153,1
Путь за цикл, м	537,0	567,1	570,1
Энергия за разгон, Вт·ч	131,4	137,3	139,4
Энергия на выходном валу двигателя за разгон, Вт·ч	102,0	110,2	111,3
Удельные затраты энергии за разгон, Вт·ч/т·км	365	305	303

поэтому рекомендовать алгоритм управления с поддержанием постоянства тока якоря двигателя при разгоне.

3.6. РАЗВИТИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Рассмотренные примеры демонстрируют большое разнообразие структурных и схемных решений по управлению тяговыми системами электромобилей. Вместе с тем можно выделить некоторые принципиальные типы организации современных систем управления тяговыми электроприводами и направления их дальнейшего развития.

Системы с постоянной структурой. Определенный этап развития систем управления электромобилями характеризуется исполнением их с жесткой и неизменяемой структурой или, иначе говоря, с неизменяемыми алгоритмами. К числу таких систем относятся прежде всего простейшие электроприводы без обратных связей. В этих системах задатчики тяги и торможения устанавливают определенное напряжение на входе или выходе тягового двигателя, который при этом работает на соответствующих механических характеристиках, определяющих частоту вращения и момент на выходном валу. Наибольшее применение такого рода управление нашло в электродвигателях постоянного тока с последовательным возбуждением.

Недостатки разомкнутых систем управления — низкая стабильность характеристик, большие броски тока в переходных режимах разгона и торможения — вызвали в дальнейшем переход к структуре управления по моменту на валу двигателя или (что проще в реализации) по току якоря двигателя. В системе подобного рода за счет обратной связи по соответствующей величине с помощью задатчиков тяги и торможения устанавливается и стабилизируется момент на валу или ток якоря электродвигателя. Принятая структура управления при этом вполне отвечает общим

требованиям управления электромобилей при разгоне и торможении, так как водитель соответствующими педалями управляет интенсивностью разгона или торможения. Такая структура управления принята для электромобиля ETV-1.

Однако для условий установившегося режима движения при меняющемся сопротивлении движению, например, из-за уклонов и подъемов, изменения качества дорожного покрытия требованиям транспортного средства более соответствует структура управления по скорости движения. По этой структуре обеспечивается автоматическое поддержание установленной водителем скорости. Такая структура отвечает и требованиям минимизации потерь энергии, так как поддержание установленной скорости водителем (не автоматическое) неизбежно связано с дополнительными потерями из-за периодов разгона и замедления при «ручном» управлении.

Однако структура управления только по скорости не удовлетворяет требованиям разгона и торможения, при которых важно задавать не конечную скорость, а интенсивность разгона или торможения. Из этого следует, что к системам управления электромобилями фактически предъявляются различные требования в различных режимах, т. е. они принадлежат к классу многокритериальных, или, иначе говоря, многоцелевых систем.

В аналоговой форме алгоритм такого многоцелевого управления в простейшей форме может быть представлен следующим образом:

$$U = \begin{cases} k_1(M_z - M), & v_z - v > \Delta; \\ k_2(v_z - v), & v_z - v \leq \Delta. \end{cases} \quad (3.59)$$

В распространенных аналоговых системах с подчиненным регулированием некоторое приближение к алгоритму (3.59) достигается за счет определенной подчиненности переменных состояния системы; при этом в режиме тяги:

$$\left. \begin{aligned} U &= k_1(\varepsilon - M); \\ \varepsilon &= k_2(v_z - v), \quad \varepsilon \leq E_m. \end{aligned} \right\} \quad (3.60)$$

где ε — ошибка по скорости, ограниченная максимальной величиной $E_m = M_{\text{макс}}$.

Многоцелевые системы с переменной структурой. В полной мере условие (3.59) может быть выполнено в системе управления, функционирующей непосредственно по этому алгоритму. Его отличительные особенности определяют вид и свойства соответствующих систем; из выражения (3.59) следует необходимость последовательного выполнения операций: проверки выполнения некоторых условий — в данном случае в виде сравнения с пороговым уровнем величины ошибки по скорости, выбора одной из двух структур управления — по моменту на валу или по скорости.

Первая часть операций означает в общем случае идентификацию режима работы по состоянию объекта управления, а вторая часть — изменение законов управления, или, иначе говоря, структуры системы управления. Следует также отметить, что в классе систем с переменной структурой (СПС), которые были описаны ранее, в дополнение к «режимным» алгоритмам типа (3.59) могут преднамеренно вводиться алгоритмы движения вдоль поверхностей переключения структуры. Эти так называемые «скользящие» движения создают специфические структурные состояния, не имеющие аналогов в системах с жесткой структурой.

Происходящее в настоящее время ускоренное развитие цифровой вычислительной техники и ее элементной базы, в частности БИС и микропроцессорных комплектов, создает благоприятные возможности рациональной и эффективной организации систем управления с переменной структурой. Для вычислительных систем является естественным свойством осуществление ветвящихся процедур, реализующих переменные алгоритмы. При этом уже в аппаратной части современных микропроцессоров закладываются команды проверки выполнения широких по составу условий выбора необходимой ветви алгоритма вычислений. Оба эти важные свойства вычислительных систем находятся в прямом соответствии с вышеизложенными принципами СПС.

Рассмотрим некоторые принципиальные особенности построения многоцелевых систем управления тяговыми приводами электромобилей, реализуемых средствами микропроцессорной техники. Будем при этом ориентироваться на так называемое «четвертое» поколение средств микропроцессорной техники, к которому принято относить комплект МС-86 и микропроцессор 8086 фирмы «Интал» (*Intel*), комплект МС 68000 фирмы «Моторола» (*Motorola*) и ряд других, а также отечественные микропроцессорные наборы КР1801, КР1810 и др. Для технических средств этого уровня, которые не являются предельными по современным возможностям, определяющими служат характеристики, приведенные ниже.

Разрядность	16
Число регистров общего назначения	8—14
Число базовых команд	80—135
Емкость непосредственно адресуемой памяти, байт.	64К—1М
Время выполнения двухадресных команд типа пересылки или сложения, мкс	0,4—2,0
Число методов адресации	12—24
Число уровней прерывания	8—256

Приведенные выше параметры в достаточной мере соответствуют необходимым требованиям по точности, быстродействию, объему оперативной и постоянной памяти практически для любых тяговых систем электромобилей.

Построение алгоритмов управления тяговыми системами электромобилей определяется функциональными требованиями и чис-

лом различающихся режимов работы. Рассмотрим для определенности тяговый электропривод с двигателем постоянного тока независимого возбуждения и тиристорным силовым преобразователем, ранее описанным.

Для электропривода этого типа можно выделить режимы работы с различающимися алгоритмами управления, которые описываются ниже.

1. Режимы тяги, когда момент на валу двигателя направлен против моментов сопротивления; они включают в свой состав:

- 1.1. движение «вперед» с регулированием момента на валу;
- 1.2. предельный по быстродействию разгон;
- 1.3. движение «вперед» с регулированием по скорости и основным управляющим воздействием по напряжению на якоре;
- 1.4. движение «вперед» с регулированием по скорости и управляющим воздействием по току возбуждения;
- 1.5. движение «назад»;
- 1.6. оптимальный по энергетике разгон до установленной скорости.

2. Режимы торможения, когда момент на валу двигателя суммируется с моментами сил сопротивления движению; в них входят:

- 2.1. управление моментом по току возбуждения — генераторное торможение;
- 2.2. управление моментом по цепи импульсного замыкания якоря двигателя — режим рекуперативно-динамического торможения;
- 2.3. экстренное торможение.

3. Режим движения «накатом», т. е. свободный выбег.

4. Режимы частичных отказов в тяговой системе, состоящие из:

- 4.1. отказа подсистемы тяги;
- 4.2. отказа подсистемы торможения.

Из приведенного перечня следует, что выделяемые режимы определяются деревом функций системы. При этом степень ветвления зависит от поставленных задач управления. В этом легко убедиться на следующем примере: вся ветвь режимов, связанных с отказами, обычно для электромобилей в настоящее время не выделяется, так как не определены задачи управления или требования при возникновении отказов. Между тем из простого логического анализа следует, что частичный отказ, не выводящий систему управления полностью из функционирования, может быть, по крайней мере, частично компенсирован соответствующими действиями системы управления и водителя. В связи с этим существует возможность построения соответствующего алгоритма управления, включая предписание водителю о необходимых действиях. Для режимов тяги и торможения значимость частичных отказов может существенно отличаться. Это определяет целесообразность разделения режимных алгоритмов и переход к следующему уровню ветвления.

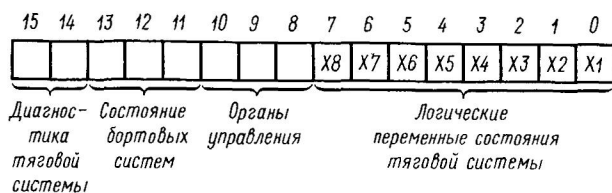


Рис. 3.16. Формат слова состояния системы

По изложенным причинам не следует считать приведенный перечень исчерпывающим, и это соображение является одним из аргументов создания гибких программируемых микропроцессорных систем управления. Именно в настоящее время, когда ведется отработка серийноспособных источников тока и электромобилей, возможности гибких систем управления являются чрезвычайно важными. Это нужно учитывать и при разработке микропроцессорных систем, которые должны предусматривать в своем составе перепрограммируемые запоминающие устройства и средства записи в них для коррекции режимных и управляющих подпрограмм по результатам испытаний и опытной эксплуатации электромобилей.

Общая организация микропроцессорных систем управления электромобилями представляет в настоящее время предмет интенсивных разработок ведущих фирм и организаций. Не останавливаясь на изложении и сравнении различных возможных вариантов, рассмотрим некоторые принципиальные вопросы построения микропроцессорных систем (МПС).

Из приведенного выше перечня режимов следует, что для каждого текущего состояния электромобиля (как объекта управления) должна производиться идентификация, или распознавание режима работы. Как правило, для этого достаточно некоторого набора переменных состояния объекта управления, т. е. из всех текущих значений проекций вектора состояния X может быть выделен вектор переменных идентификации $X_{и}$, существенно меньшей размерности. Задача разработки МПС включает, в частности, и выбор $X_{и}$ -минимальной размерности. Далее, так как задачу идентификации можно представить себе как определение, в какой области пространства возможных состояний находится объект управления, то вектор $X_{и}$ можно преобразовать в набор дискретных значений его проекций $\bar{X}_{и}$, представляющих границы режимных областей. Переходя к относительным значениям переменных идентификации, можно представить вектор $\bar{X}_{и}$ в удобном для МПС виде логических переменных.

Результатом последующего объединения логических переменных является «слово состояния системы» (ССС), формат которого приведен на рис. 3.16. Для собственно $X_{и}$ в СССР выделены первые 8 разрядов, т. е. байт логических переменных состояния тя-

говой системы. Старший байт образуют логические сигналы состояния органов управления педали хода и торможения автомобиля, а также переключатель направления движения, диагностические сигналы наличия отказов в подсистемах тяги и торможения (два старших бита) и биты состояния других бортовых систем, которые могут управляться от центрального процессора. К числу таких бортовых систем могут быть отнесены система управления зарядом батареи от сети (кстати, этот режим может также быть выделен), система отопления — охлаждения, сеть бортового электрооборудования 12 В и т. п.

Общий алгоритм МПС содержит две основные функциональные группы команд: первая группа включает команды, относящиеся к процедуре идентификации режима, а вторая — осуществляет собственно формирование и вывод команд управления. Организующая часть общего алгоритма (ее можно назвать программой-диспетчером) показана на рис. 3.17. Согласно этому алгоритму после запуска МПС внешним устройством (это может быть, например, замок «зажигания») циклический характер воспроизведе-

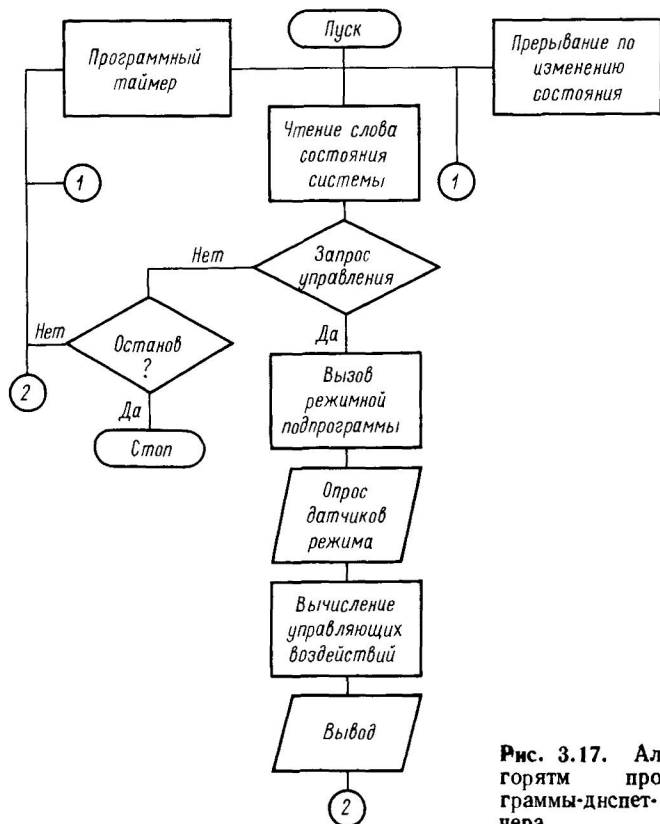


Рис. 3.17. Алгоритм программы-диспетчера

ния команд обеспечивается программным таймером. В алгоритме программы-диспетчера предусматривается, что по разным входам программного таймера задаются различные временные интервалы повторения циклов. Цикл начинается с чтения слова состояния системы. Прочитанное слово анализируется на наличие запроса управления. Отсутствие запроса управления может означать либо соответствие состояния объекта командам управления водителя, либо отсутствие команд управления водителя (обе педали отпущены, электромобиль стоит). В связи с этим случай отсутствия команд водителя отделяется и вызывает останов МПС.

При отсутствии запроса управления из-за соответствия состояния объекта командам водителя программный таймер задает «дежурный» режим с увеличенной продолжительностью интервала повторения опроса. Ранее сформированные команды управления сохраняются в выходном интерфейсе, т. е. поддержание состояния объекта обеспечивается их запоминанием.

При наличии запроса управления слово состояния системы интерпретируется в качестве кода режимной подпрограммы алгоритма управления в данном режиме и осуществляет вызов из ППЗУ этой подпрограммы, или, точнее, вход в подпрограмму по ее начальному адресу в ППЗУ. В соответствии с режимной подпрограммой производится упорядоченный опрос датчиков состояния системы, сигналы которых участвуют в формировании команд управления согласно режимному алгоритму. Выборочный опрос датчиков позволяет сократить время выполнения подпрограммы и несколько упрощает организацию интерфейса датчиков и устройств первичной обработки информации. Конечным результатом выполнения подпрограммы режима являются значения необходимых управляющих воздействий или собственно команды управления, которые выводятся в соответствующий интерфейс.

Для выделенного ранее статического режима тяги 1.3 такими командами являются применительно к схеме, приведенной на рис. 3.3, со «скользящим» режимом по току якоря граничные значения «трубки» тока якоря, т. е. максимальное и минимальное значения этого тока, а также значение тока возбуждения двигателя, определяемое по статическому критерию минимизации потерь в тяговой системе. Для режима 1.4 остается только команда, определяющая величину тока возбуждения двигателя, так как силовой импульсный преобразователь в цепи якоря в этом режиме насыщен. Очевидно, что возможности оптимизации в этом режиме отсутствуют из-за ограниченности ресурсов управления. Этим объясняются, в частности, причины разделения режимов 1.3 и 1.4.

Другие примеры, характеризующие режимные подпрограммы, могут быть приведены для управления разгоном. Разделение режимов предельного и оптимального по энергетике разгона может быть произведено по переменным идентификации, сформирован-

ным из ошибки по скорости и нажатия на педаль хода. Порог (или верхний порог) ошибки по скорости и порог перемещения педали хода в слове состояния системы идентифицируют режим предельного разгона электромобиля. При этом команды на ток якоря и ток возбуждения задают максимально возможный момент на валу двигателя. Этот режимный алгоритм достаточно прост и вычисляется за весьма малый промежуток времени, что соответствует требованиям по необходимому быстродействию управления в этом режиме.

Ноль в бите порога перемещения педали тяги и единица в бите порога ошибки по скорости идентифицируют (разумеется, при соответствующих состояниях других разрядов слова состояния системы) режим оптимального разгона. На основе информации соответствующих датчиков, в частности, о перемещении педали тяги, которое задает конечную установленную водителем скорость электромобиля, и дополнительной информации из ППЗУ, например о регламентированном для заданной конечной скорости электромобиля времени разгона, вычисляются параметры оптимального по энергетике процесса разгона. При этом может быть использован алгоритм построения «квазиоптимального» управления, описанного ранее в п. 3.5. Возможен более простой вариант, когда после определения граничного времени t_1 , начального ускорения \dot{v}_0 и тока якоря, соответствующего этому ускорению, полученное значение тока якоря устанавливается как постоянное до конца разгона, или точнее до достижения окрестности установившегося режима, соответствующего заданной водителем скорости. После этого произойдет смена режима работы и алгоритма МПС.

В дополнение к процедуре построения «квазиоптимального» управления возможности МПС позволяют корректировать диаграмму разгона, т. е. режимный алгоритм управления по состоянию разряженности аккумуляторной батареи. Для современных батарей при снижении их емкости повышается внутреннее сопротивление батареи, а следовательно, и потери энергии в ней. В соответствии с этим по информации датчиков состояния батареи необходимо изменение параметра $u_{гр}$. Такая текущая идентификация состояния тяговой батареи позволяет осуществить адаптивное управление в МПС при очень небольших модификациях исходных алгоритмов. Учет новых свойств создаваемых источников тока также сводится к частичной модификации режимных алгоритмов некоторых режимов.

Алгоритм, приведенный на рис. 3.17, предусматривает прерывания по изменению состояния системы. В данном случае при любом изменении состояния системы осуществляется запрос прерывания, сбрасывается программный таймер и запускается цикл формирования команд управления. Если микропроцессорная система управления ограничивалась бы только функциями тяговой, то такой простой вид прерываний был бы достаточен. При

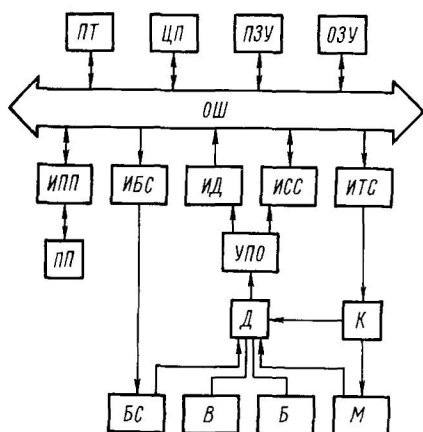


Рис. 3.18. Конфигурация макропроцессорной системы управления

использовании МПС для общих задач управления на электромобиле требуется введение иерархии прерываний, имея в виду, что после сигналов датчиков аварийного состояния и запросов водителя управление тяговой системой должно иметь старший уровень по отношению к другим бортовым системам.

Возможная конфигурация МПС, охватывающей основные задачи управления и информации электромобиля, показана на рис. 3.18. Ядро системы образуют центральный процессор ЦП, программный таймер ПТ, запоминающие устройства типа ПЗУ (или ППЗУ) и ОЗУ. Для рассматриваемых задач приемлема организация связей ЭВМ в виде общей шины ОШ. Внешние устройства электромобиля представлены следующим образом: тяговую систему образуют электродвигатель М, батарея Б и контроллер К, под которым имеется в виду исполнительный блок системы управления; остальные системы отнесены к бортовым БС; ПП представляет собой информационную панель («панель приборов»), В — водитель. Информация о состоянии всех систем собирается датчиками Д и обрабатывается устройством первичной обработки УПО. Это устройство осуществляет сжатие, а также преобразование из аналоговой в цифровую и логическую форму всей поступающей от датчиков информации. Остальные блоки ИПП, ИБС, ИД, ИСС, ИТС — интерфейсные.

3.7. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЯГОВЫХ СИСТЕМ

Обеспечение эффективной эксплуатации электромобилей является конечной целью, определяющей как требования к тяговым системам, так и сравнение различных их вариантов. Исходя из этого, можно выделить следующие основные эксплуатационные характеристики:

- функциональные качества, реально достигаемые в процессе эксплуатации;

- энергетические показатели или реальный эксплуатационный запас хода;

- показатели надежности и ущерб, причиняемый отказами в работе;

- показатели регламентного обслуживания.

Разнообразие условий эксплуатации даже при современном весьма ограниченном числе электромобилей оказывается весьма

Характеристики движения электромобиля при стандартных испытательных циклах

Цикл	v , км/ч	t_a , с	$t_{c\phi}$, с	t_{co} , с	t_{θ} , с	t_1 , с	T , с	Тип эксплуатации
A	$16 \pm 1,5$	4 ± 1	0	2 ± 1	3 ± 1	30 ± 2	39 ± 2	Доставка почты, мелкая развозка
B	$32 \pm 1,5$	19 ± 1	19 ± 1	4 ± 1	5 ± 1	25 ± 2	72 ± 2	Доставка товаров в магазины
C	$48 \pm 1,5$	18 ± 2	20 ± 1	8 ± 1	9 ± 1	25 ± 2	80 ± 2	Централизованные развозки
D	$72 \pm 1,5$	28 ± 2	50 ± 2	10 ± 1	9 ± 1	25 ± 2	122 ± 2	Пригородный режим движения

существенным. Это сказывается на всех основных эксплуатационных характеристиках. Сравнение и отбор тяговых систем в этих условиях затруднителен. В связи с этим существует стремление регламентировать условия хотя бы некоторых основных видов испытаний, взяв за основу усредненные эксплуатационные условия. Наиболее полно это стремление представлено в методике испытаний электромобилей *SAEj 227a* [54].

В качестве основной эксплуатационной характеристики эта методика устанавливает запас хода при: установившейся скорости движения, обычно составляющей 40 км/ч; движение по стандартным испытательным циклам, общий вид которых показан на рис. 3.19, а параметры циклов *A, B, C, D* приведены в табл. 3.11.

Испытания на запас хода проводятся в идеализированных условиях, т. е. на сухой горизонтальной дороге с ровным асфальтовым покрытием при скорости ветра не более 2,7 м/с. Конец испытаний при установившейся скорости определяется по моменту снижения скорости движения до 95 % от первоначально установленной. Конец испытаний при движении по стандартному циклу фиксируется по последнему циклу, воспроизведенному в пределах допусков, которые указаны в табл. 3.11. Для наиболее употребительного цикла *C* длина перегона составляет 537 м, средняя скорость движения — 25 км/ч, среднее ускорение при разгоне $0,74 \text{ м/с}^2$, а при торможении — $1,23 \text{ м/с}^2$. Рассчитанный по методике работы [20] расход энергии за

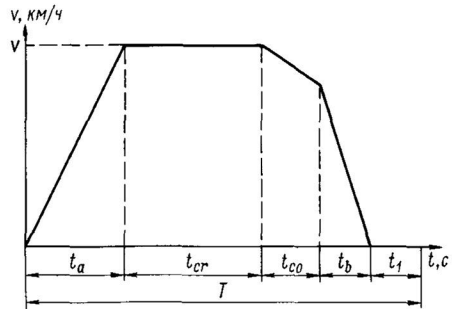


Рис. 3.19. Диаграмма скорости для стандартного испытательного цикла *SAEj 227 a*

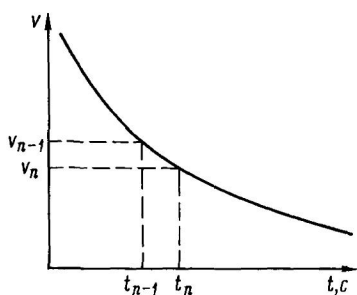


Рис. 3.20. Кривая скорости при выбеге

цикл С составляет для усредненных характеристик тяговых систем 124,7 Вт. ч/(т. км). Аналогичный цикл, разработанный НАМИ, использовался при испытаниях некоторых отечественных электромобилей. Он предусматривал линейный разгон до скорости 50 км/ч, установившееся движение с этой скоростью и торможение [19]. Длина перегона по этому циклу — 500 м, средняя скорость — 21,7 км/ч. При этом средний расчетный расход энергии по циклу составляет 136,8 Вт. ч/(т. км).

Для определения расхода мощности на преодоление сопротивления движению SAEj 227 а предлагает метод свободного выбега. Выделяя из общего баланса мощности электромобиля дорожные и аэродинамические составляющие сопротивления движению, этот метод позволяет повысить точность определения потерь энергии собственно в тяговой системе. По экспериментально снимаемой кривой скорости электромобиля при выбеге, показанной в качестве примера на рис. 3.20, определяется средняя мощность, затрачиваемая на движение при скорости

$$\bar{v}_n = (v_n + v_{n-1})/2, \quad (3.61)$$

по следующей рекомендуемой формуле

$$P_n = 3,86 \cdot 10^{-5} G \frac{v_{n-1}^2 - v_n^2}{t_n - t_{n-1}}. \quad (3.62)$$

Из этой же кривой скорости при выбеге определяется энергия потерь по формуле

$$W_n = 7,72 \cdot 10^{-5} G \frac{v_{n-1} - v_n}{t_n - t_{n-1}}. \quad (3.63)$$

Для практических расчетов проще использовать несколько видоизмененные формулы (3.62) и (3.63). Вначале определяются удельные потери энергии при скорости \bar{v}_n в виде

$$\omega_n = 0,278 a_n, \quad (3.64)$$

где a_n — абсолютная величина замедления при свободном выбеге и скорости \bar{v}_n .

После этого потребная для движения электромобиля мощность на колесах равна

$$P_n = \omega_n G \bar{v}_n. \quad (3.65)$$

Для некоторых отечественных электромобилей результаты экспериментального определения величин ω_n и P_n по кривым

Характеристики отечественных моделей электромобилей, рассчитанные по кривым выбега

Тип электро-мобля	Параметр	Скорость установившегося движения, км/ч				
		10	20	30	40	50
РАФ-2910	W	39	46	52	58	64
	P	1,17	2,76	4,68	6,96	9,6
ЕрАЗ-3734	W	35	42	49	57	64
	P	1,05	2,55	4,42	6,81	9,6
ВАЗ-2801	W	47	51	56	62	68
	P	0,75	1,7	2,8	4,1	5,7

Примечание. В таблице значения W даны в Вт.ч/(т.км); P — в кВт.

выбега приведены в табл. 3.12. Результаты использования этого метода и, в частности, данные табл. 3.12 находятся в достаточно хорошем соответствии с другими результатами испытаний и расчетов тяговых систем электромобилей. В связи с этим метод свободного выбега можно считать надежным. Однако в реальных условиях эксплуатации расход энергии оказывается заметно выше, чем данные результатов испытаний. Основной причиной подобного явления можно считать более высокие коэффициенты сопротивления движению из-за худшего качества дорожного покрытия на городских дорогах, чем на испытательных полигонах. Следствием этого является меньший реальный эксплуатационный запас хода, чем рекламируемый фирмой-изготовителем электромобиля.

Имеется еще одно обстоятельство, которое обычно не учитывается при оценке эксплуатационных качеств электромобилей по результатам их испытаний. Водитель электромобиля (как впрочем и автомобиля) должен быть уверен в достижении конечного пункта движения за счет имеющегося запаса энергии. Для этого требуется и определенный избыток энергии на случаи непредвиденных изменений дорожных условий и ситуации на маршруте. За этим объективно скрывается заметный экономический ущерб от непредвиденной остановки электромобиля на маршруте и транспортировки его к месту пополнения запаса энергии. Этот запас избыточной энергии, не расходуемый в обычных условиях движения, может обеспечивать 10—12 км пробега, что представляет значительную часть от общего запаса хода современных электромобилей.

Целесообразно поэтому ввести эксплуатационный показатель, который назовем «коэффициентом надежности пробега» и определим зависимостью

$$k_n = L_0/L_n, \quad (3.66)$$

где L_a — средний используемый в эксплуатации запас хода от одной зарядки батарей, км; L_n — запас хода на испытаниях по методикам SAE j 227a, км.

Опыт эксплуатации электромобилей свидетельствует о том, что этот коэффициент достигает величины 0,8. Для его повышения необходим ряд мероприятий типа правильного определения и строгого соблюдения маршрута поездок, оперативного учета изменения дорожной обстановки, поддержания высокого технического уровня электромобилей, в том числе их тяговых систем.

Вопрос о функциональных эксплуатационных качествах тяговых систем раскрывает в гораздо меньшей степени, чем о запасе хода и энергетике. В целом эти показатели должны отражать степень соответствия электромобиля условиям работы транспортного средства. Некоторые из этих показателей выявляются общепринятыми автомобильными методиками: например такие, как управляемость и устойчивость, для которых имеются испытания типа перестановки, движения на повороте и др. Однако ряд функций, к которым относятся удобство управления, возможности маневрирования на ограниченном участке, поддержание постоянной скорости при движении в колонне или городском потоке и другие, пока не имеют стандартизованных методик проверки и для них обычно используется метод экспертных оценок.

Заметим, что именно по некоторым функциональным показателям даже современные электромобили имеют преимущества перед автомобилями. Отсутствие стандартных объективных критериев не позволяет в должной мере оценить значимость этих преимуществ, а следовательно, и затраты на их достижение не имеют экономического обоснования. Это можно пояснить на следующем примере. В тяговых системах электромобилей малая скорость движения порядка 2—3 км/ч может быть получена с высокой точностью и без затраты каких-либо усилий со стороны водителя. Кроме того, реверсирование движения производится водителем простым переключением маленького переключателя типа тумблера: на это требуется 0,1—0,2 с. Такие два качества принципиально позволяют совершать маневрирование на ограниченном пространстве с заметно более высокой точностью и за меньшее время, чем это при прочих равных условиях возможно на современных автомобилях того же класса. Для малотоннажных грузовых транспортных средств эти функциональные качества имеют достаточно важное значение, так как маневрирование в пунктах погрузки и выгрузки занимает значительное время в составе выполняемых операций по доставке грузов.

Отсутствие по функциям такого рода стандартных методик и критериев затрудняет также сравнение между собой различных типов тяговых электроприводов. Например, электропривод с двухзонным регулированием и силовым полупроводниковым преобразователем для питания якоря двигателя обладает более высокими функциональными качествами, чем электропривод с пере-

ключением секций тяговой батареи и дополнительными реостатными ступенями. Однако и стоимость первого варианта существенно выше. Вопрос о сравнительной экономической оценке этих вариантов остается неразрешимым без указанных выше объективных критериев функциональности.

Показатели надежности современных электромобилей в условиях эксплуатации являются достаточно простыми, что уже позволило накопить ряд статистических данных по ним. В качестве примера приведем данные по эксплуатации 107 электромобилей «Баттроник» (*Batronic*) на 62 транспортных предприятиях США и Канады. Этот электромобиль при полной массе 3083 кг имеет грузоподъемность 410 кг и тяговую свинцово-кислотную батарею массой 545 кг (относительные массы: груза — 0,133 и батареи — 0,176, т. е. достаточно низкие). Для этих электромобилей в среднем достигнуты следующие эксплуатационные показатели: запас хода — 48 км, удельный расход энергии — 0,272 Вт·ч/(т·км), средний пробег за пятидневную неделю 79,2 км. При этом наработка на один отказ составила 625 км пробега. Среднее время восстановления после отказа — 6 ч.

Наибольший опыт эксплуатации в отечественной практике накоплен для электромобилей типа УАЗ с электроприводом переменного тока и свинцово-кислотными батареями 6ЭМ-60. Крайне низкая надежность этих батарей фактически определила общие показатели эксплуатации. При первой заливке этих батарей около 25 % их выходит из строя, а за первые два месяца эксплуатации выход из строя достигает 45 %. Реальный эксплуатационный ресурс батареи не превышает 100 циклов заряд—разряд. Средний удельный расход энергии для этих электромобилей составляет 272 Вт·ч/(т·км), а средний запас хода — около 22 км.

Представляют интерес статистические данные (относительная частота в процентах) причин отключения тягового электрооборудования без учета батарей, приведенных ниже.

Отказ тягового асинхронного двигателя	18
Отказ в системе управления	18
Отказы силовых тиристоров	14
Пробои коммутирующих конденсаторов	12
Срабатывание защиты из-за сбоя	19
Прочие причины	19

В приведенных данных обращает на себя внимание низкая эксплуатационная надежность таких элементов, как асинхронный электродвигатель и силовые тиристоры, которые, в принципе, имеют высокую собственную надежность в нормальных условиях работы.

Из опыта эксплуатации электромобилей УАЗ выявлена необходимость создания к моменту выпуска электромобилей систем диагностики — бортовой и стендовой, обеспечивающих снижение трудоемкости обнаружения неисправностей тягового электрооборудования.

Система эксплуатационного обслуживания, в принципе, зависит от сферы потребления электромобилей, т. е. от частного использования или использования предприятиями. Так как в нашей стране в ближайшем будущем не ожидается частное использование легковых электромобилей, то остановимся только на системе обслуживания электромобилей предприятиями.

Система обслуживания имеет в принципе типовую структуру и состоит из следующих этапов: первичной подготовки к работе; технического обслуживания; подсистемы ремонтного обслуживания.

Первичная подготовка к работе тяговых систем состоит из ряда контрольных и подготовительных операций, регламентированных в инструкциях предприятий-изготовителей. Эти операции имеют единообразный характер для основных типов тяговых систем; они состоят из расконсервации, проверки изоляции электрооборудования, сушки (при необходимости), тестовых проверок системы управления, заливки и формовки аккумуляторных батарей и т. д.

Техническое обслуживание тяговых систем состоит из этапов и работ, приведенных в табл. 3.13.

Операции, относящиеся к контрольному и ежедневному обслуживанию, однотипны практически для любых видов тяговых систем. Различия в типах тяговых батарей проявляются в основ-

Таблица 3.13

Виды обслуживания и содержание работ для электромобилей

Вид обслуживания	Обозначение	Рекомендуемая периодичность		Содержание работ
		время	пробег, км	
Контрольный осмотр	КО	Ежедневно	—	Осмотр при сдаче электромобиля водителю, тест-проверка функционирования ТП1
Ежедневное обслуживание	ЕО		—	Приемка от водителя, тест-проверка ТП1, очистка и сушка, проверка состояния батарей, зарядка батарей, проверка изоляции
Техническое обслуживание № 1	ТО-1	100 ч, но не реже 1 раза в месяц	1 000	Осмотр состояния электродвигателя и агрегатов, тест-проверка ТП2, подтяжка болтовых соединений и контактов, очистка контактов и печатных плат
Техническое обслуживание № 2	ТО-2	1000 ч	30 000	Частичная разборка электродвигателя и агрегатов электропривода, контроль параметров ТП3, частичная регулировка параметров

Перечень операций и трудоемкость обслуживания коллекторно-щеточного узла электродвигателей

Операция	Содержание операции	Трудоемкость, нормо-ч
ТО-1 Осмотр и проверка щеток и щеткодержателей	Проверка перемещения щетки в щеткодержателе, состояния щетки на отсутствие механических повреждений, высоты щетки и площади контакта на ее поверхности	0,42—0,58 0,03л
Проверка пружин Осмотр коллектора	Замер усилия нажатия пружины Осмотр и протирка поверхности коллектора	0,01л 0,1
ТО-2 Проточка коллектора	Частичная разборка электродвигателя, проточка коллектора, продорознение и шлифовка коллектора, сборка электродвигателя	4,0 3,0
Замена и притирка щеток	Установка на двигатель предварительно притертых начерно щеток, окончательная притирка, проверка поверхности, контакта	1,0
Примечание. л — число щеток.		

ном на уровнях ТО-1 и ТО-2, а в настоящее время — в необходимости также регулярного обслуживания в промежутках между ЕО и ТО-1. Примером этого могут служить современные никель-цинковые аккумуляторные батареи, которые нуждаются в регулярной глубокой доразрядке через каждые 4—6 циклов заряд—разряд, а также практически еженедельной доливке электролита. В аналогичной доливке электролита или дистиллированной воды нуждаются очень многие типы современных тяговых батарей.

В зависимости от ресурса и надежности тяговой батареи в состав ТО-1 и ТО-2 входят или не входят такие операции, как контрольный цикл «заряд—разряд» и разбраковка по остаточной емкости отдельных аккумуляторов.

Для электродвигателей постоянного тока в состав ТО-1 входят операции по проверке коллекторно-щеточного узла, выделенные в табл. 3.14. В состав ТО-1 для тяговых электроприводов всех типов входят операции проверки подшипников электродвигателей, осмотр таких узлов и агрегатов, как задатчики, датчики, релейно-контакторная аппаратура, а также более подробная чем ТП1 тест-проверка системы управления и тяговой системы в целом, условно названная ТП2. В зависимости от исполнения системы управления эта тест-проверка может иметь различную сложность, однако следует считать, что это определяет не трудоемкость проверки, а сложность оборудования и тест-программ для ее осуществления. Учитывая необходимость осмотра и очистки элементов системы управления (для чего требуется снятие кожухов, крышек

и т. п.), можно оценить трудоемкость этих операций ориентировочно в 0,2—0,3 нормо-ч.

В настоящее время вопрос об эксплуатационных преимуществах тяговых электроприводов с бесколлекторными двигателями является дискуссионным из-за отсутствия количественных оценок. Этому способствует нечеткость разделения уровней обслуживания электродвигателей постоянного тока между ТО-1 и ТО-2.

Вынесение дополнительных операций обслуживания коллекторно-щеточного узла на уровень ТО-1 резко повышает эксплуатационные расходы, так как частота техобслуживания вида ТО-1 на порядок выше, чем ТО-2. Для правильного установления периодичности обслуживания коллекторно-щеточного узла необходимо использовать результаты испытаний современных типов электрощеток, например приведенных в табл. 3.1, а также количественные характеристики по эксплуатации тяговых электродвигателей постоянного тока. С учетом реальных значений скорости износа щеток и коллектора, а также необходимых запасов на различные условия эксплуатации, замену щеток и некоторые другие операции обслуживания коллекторно-щеточного узла следует отнести в состав ТО-2. Эти операции и их трудоемкость приведены в табл. 3.14.

Заметим, что операция ТО-2 в отличие от ТО-1 требует централизованного выполнения на специально оборудованных участках обслуживания. При этом совмещение операций ТО-2 для достаточного числа электромобилей (порядка 5—10) позволяет снизить трудоемкость наиболее существенных операций.

Для электроприводов практически любых типов общими операциями ТО-2 являются замена смазки, контроль и регулировка аппаратов управления, полная диагностическая проверка и регулировка блоков системы управления по тест-программам ТПЗ.

Глава 4. ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

4.1. КРИТЕРИЙ И ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Одним из основных направлений повышения эффективности автомобильного транспорта является оптимизация структуры парка автомобилей, которая предполагает разработку, производство и использование для перевозок различных видов народнохозяйственных грузов наиболее экономичных транспортных средств. Однако многие аспекты этого важного направления пока недостаточно разработаны и обоснованы. В частности, не решены вопросы о показателях и о критерии эффективности автомобильных транспортных средств, по которым имеется ряд различных точек зрения и предложений. Так, в учебнике «Автомобильные перевозки» под редакцией Л. Л. Афанасьева [5] выбор транспортного средства рекомендуется производить на основе сравнительного анализа производительности и себестоимости перевозок грузов автомобилями различных марок.

Ряд критериев «оптимальности выбранного транспортного средства для определенного вида груза» предлагается Д. П. Великановым [11]. К ним относятся приведенные затраты на перевозки, производительность транспортных средств, трудоемкость их использования, энергоемкость и материалоемкость (металлоемкость) перевозок.

Н. Н. Тихомиров в работе [42] предлагает осуществлять выбор рационального транспортного средства на основе сравнения вариантов по группе затрат на доставку грузов, включающих затраты на перевозку, транспортно-экспедиционные и погрузо-разгрузочные работы, на тару и упаковку, а также затраты, обусловленные качественными и количественными потерями грузов при транспортировке.

Имеются предложения и других авторов, но, как правило, они сводятся к приведенным выше подходам. При этом следует отметить, что наиболее часто в качестве критерия и показателей эффективности транспортных средств предлагается использовать производительность, себестоимость перевозок, либо приведенные затраты.

Решение вопроса о целесообразности создания и внедрения новой техники долговременного пользования в настоящее время согласно существующей «Методике (основным положениям) определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений» [26] принимается на основе экономического эф-

фекта, определяемого на годовой объем производства в расчетном году по формуле

$$\mathcal{E} = \left[\mathcal{Z}_1 \frac{B_2}{B_1} \frac{P_1 + E_H}{P_2 + E_H} + \frac{(H'_1 - H'_2) - E_H (K'_2 - K'_1)}{P_2 + E_H} - \mathcal{Z}_2 \right] A_2, \quad (4.1)$$

где \mathcal{Z}_1 и \mathcal{Z}_2 — приведенные затраты на единицу соответственно базового и нового средства труда, определяемые по формуле

$$\mathcal{Z} = C + E_H K,$$

в которой C — себестоимость единицы продукции (работы), руб.; K — удельные капитальные вложения в производственные фонды, руб.;

B_2/B_1 — коэффициенты учета роста производительности единицы нового средства труда по сравнению с базовым;

B_1 и B_2 — годовые объемы продукции (работы), производимой при использовании единицы базового и нового средства труда соответственно в натуральных единицах;

$\frac{P_1 + E_H}{P_2 + E_H}$ — коэффициент учета изменения срока службы нового средства труда по сравнению с базовым;

P_1 и P_2 — доли отчислений от балансовой стоимости на полное восстановление (реновацию) базового и нового средства труда; рассчитываются как величины, обратные срокам службы средств труда, определяемым с учетом их морального износа;

E_H — нормативный коэффициент эффективных капитальных вложений (0,15);

$\frac{(H'_1 - H'_2) - E_H (K'_2 - K'_1)}{P_2 + E_H}$ — экономия потребителя на текущих издержках эксплуатации и отчислениях от сопутствующих капитальных вложений за весь срок службы нового средства труда по сравнению с базовым, руб.;

K'_1 и K'_2 — сопутствующие капитальные вложения потребителя (капитальные вложения без учета стоимости рассматриваемых средств труда) при использовании базового средства труда в расчете на объем продукции, производимой с помощью нового средства труда, руб.;

H'_1 и H'_2 — годовые эксплуатационные издержки потребителя при использовании им базового и нового средства труда в расчете на объем продукции, производимой с помощью нового средства труда, руб.; в этих издержках учитывается только часть амортизационных отчислений, предназначенных на капитальный ремонт средств труда, т. е. без учета средств на их реновацию, а также амортизационные отчисления по сопутствующим капитальным вложениям потребителя;

A_2 — годовой объем производства новых средств труда в расчетном году в натуральных единицах.

Согласно этой методике критерием эффективности новой техники (применительно к автомобильному транспорту) являются

приведенные затраты, по разности которых (с учетом фактора времени и производительности) оценивается экономический эффект.

Недостатки выражения (4.1) и в целом методических указаний неоднократно обсуждались в печати. Дискуссионный характер рассматриваемых вопросов создает определенные трудности при оценке области эффективного использования электромобилей.

В связи с этим, чтобы объективно решить вопрос о критерии и показателях эффективности транспортных средств и, следовательно, электромобилей, необходимо исходить из сущности наиболее общей экономической категории, т. е. такой, как эффективность общественного производства.

Большинство советских экономистов рассматривает эффективность общественного производства как социально-экономическую категорию, непосредственно связанную с основным экономическим законом общественной формации, считая, что «содержание основного экономического закона дает нам критерий эффективности социалистического производства».

В данном случае критерий эффективности социалистического общественного производства формируется как максимальное удовлетворение потребностей (или максимизация удовлетворения потребностей); иногда — как максимизация фонда потребления. Следует отметить, что данные критерии в наибольшей степени соответствуют эффективности в целом общественного воспроизводства как совокупности фаз: производство, обращение и потребление.

Критерий эффективности общественного производства в общем виде может быть сформулирован как наиболее полное удовлетворение народного хозяйства и населения в производимой продукции при заданных ресурсах.

Показатели эффективности должны в полной мере отражать сущность найденного критерия эффективности общественного производства. В связи с этим проведем краткий анализ предлагаемых в настоящее время для этих целей показателей, выбрав наиболее типичные из них. Можно условно выделить затратный и ресурсный варианты показателей эффективности.

К первой группе следует отнести показатель, предлагаемый рядом ученых, в том числе А. А. Волковым, А. И. Зиминым-Компановским, Т. Е. Ковалевой [12],

$$\mathcal{E} = m/(c + V + m). \quad (4.2)$$

Близкий по содержанию показатель предлагает Е. Б. Зинина

$$\mathcal{E} = (V + m)/(c + V + m); \quad (4.3)$$

где m — стоимость прибавочного продукта, руб.; V — необходимый продукт в стоимостном выражении, руб.; c — присоединенная часть стоимости созданного продукта, руб.

Согласно объективным экономическим процессам (как указывал К. Маркс) «по мере развития производительной силы труда стоимость сырья образует все возрастающую составную часть стоимости товарного продукта»¹.

Следовательно, каждый из этих и подобных им показателей будет иметь тенденцию к снижению. Иногда для расчета эффективности общественного производства предлагаются показатели типа

$$\mathcal{E} = \frac{V + m}{V + m + a + EF}, \quad (4.4)$$

где a — амортизация, руб.; E — нормативный показатель экономической эффективности; F — авансированные фонды, руб.

Зависимость (4.4) представляет собой промежуточный вариант показателя между затратным и ресурсным. Показатели такого типа предлагаются и другими авторами.

Чтобы подтвердить неправомочность использования упомянутого показателя, преобразуем его к виду

$$\mathcal{E} = \frac{1}{1 + \frac{a + EF}{V + m}}. \quad (4.5)$$

Из полученного выражения видно, что показатель эффективности стремится к единице в двух случаях:

1) при $(a + EF) \rightarrow 0$,

2) при $(V + m) \rightarrow \infty$.

Очевидно, что с точки зрения этого показателя наиболее эффективными мероприятиями будут наименее технически оснащенные. В связи с этим такой показатель не способствует развитию научно-технического прогресса.

Сторонником ресурсного варианта показателя эффективности общественного производства является М. З. Бор, которым предлагается следующий показатель эффективности:

$$K = \mathcal{E}/P, \quad (4.6)$$

где \mathcal{E} — эффект (любой положительный результат); P — ресурсы (это могут быть основные фонды, оборотные средства, трудовые ресурсы и др.).

В таком показателе все виды ресурсов приводятся к единой размерности с помощью ряда коэффициентов, часть из которых условна, а поэтому искусственность их очевидна. Здесь трудности состоят в оценке весомости, значимости отдельных видов ресурсов, которые используются в производстве, определяемой вводимыми в выражение (4.6) коэффициентами.

В связи с этим анализируемые показатели имеют существенные недостатки, что не позволяет использовать их на практике. В этой

¹ К. Маркс и Ф. Энгельс. Соч. Т. 25. Ч. 1, с. 121.

связи они не могут быть исходной базой для показателей эффективности производства на более низких уровнях (объединение, предприятие и т. д.) и для оценки экономической эффективности технических решений.

Сформулированный выше критерий эффективности общественного производства (как наиболее полное удовлетворение народного хозяйства и населения в производимой продукции и работе при заданных ресурсах) может быть реализован в показателе, отражающем полноту использования ресурсов, которые необходимы для достижения поставленной цели.

Согласно вышеизложенному в показателе эффективности производства необходимо сопоставить объем продукции, произведенной за определенный промежуток времени, с тем, который мог бы быть произведен при полном использовании ресурсов за тот же период.

Один из возможных вариантов такого показателя может иметь вид

$$E = \frac{KП}{\sum_{i=1}^k \frac{O\Phi_i}{T_i} + MЗ + OC + \frac{V' + m'}{t_p} N\Phi}, \quad (4.7)$$

где $KП$ — конечный продукт, руб.; $O\Phi_i$ — среднегодовая стоимость основных фондов i -го вида, руб.; $i = \overline{1, k}$ — количество видов основных фондов; T_i — нормативный срок службы i -го вида основных фондов, лет; $MЗ$ — материальные затраты на производство, руб.; OC — среднегодовая стоимость запасов нормируемых оборотных средств, руб.; $(V' + m')$ — вновь созданная стоимость в расчете на одного работающего в рассматриваемом периоде, руб.; t_p — фактическое среднее время работы одного работающего, ч; N — численность работающих, чел.; Φ — средний за период фонд рабочего времени одного работающего, ч.

В числителе выражения конечный (без повторного счета) продукт, созданный за рассматриваемый период времени, примем за год. В знаменателе — стоимость продукта, который мог бы быть создан при полном использовании ресурсов. Первая составляющая знаменателя отражает стоимость, которая могла бы быть перенесена на стоимость вновь созданного продукта при полном использовании основных фондов, вторая и третья — стоимость оборотных средств, последняя — стоимость вновь созданного продукта при полном использовании фонда рабочего времени всех работающих.

Показатель возрастает, если (при прочих равных условиях) соблюдается экономия материальных затрат, сокращается стоимость запасов нормируемых оборотных средств, а также неустановленного оборудования и повышается степень его использования, растет производительность труда, степень использования рабочего времени, сбалансированность всех видов ресурсов,

сокращается численность работающих и т. д., т. е. во всех случаях, когда речь идет о повышении эффективности производства. В пределе этот показатель стремится к единице.

Анализ полученного выражения показывает, что оно может быть использовано для оценки эффективности производства на различных уровнях — народнохозяйственном, предприятия, хозяйственной бригады и т. д. Учитывая изложенное, предлагаемый показатель может быть методологической основой для оценки эффективности технических решений.

На данном уровне оценки эффективности производства значения величин, входящих в выражение (4.7а), приобретают следующий смысл:

$KП$ — объем продукции, производимой техникой в единицу времени (производительность); $OФ$ — стоимость техники, включая дополнительное оборудование, необходимое для ее функционирования; $MЗ$ — текущие издержки; $OС$ — стоимость запасов нормируемых оборотных средств как условие бесперебойной работы техники; Φ/t_p — коэффициент использования рабочего времени при применении техники данного вида; V' — средняя заработная плата одного работника, обслуживающего технику; N — численность работников, обслуживающих технику; m' — прибавочный продукт.

Учитывая, что в настоящее время отношение m/V близко к единице [45], а также понимая под техникой транспортные средства, получим следующее выражение:

$$E = \frac{P}{\frac{Ц}{T} + \frac{C_d}{T_d} + И + OС + 2KЗП}, \quad (4.7a)$$

где P — производительность транспортного средства в стоимостном или натуральном (т. км) выражении; $Ц$ — стоимость транспортного средства, руб.; T — срок службы автомобиля, годы; C_d и T_d — стоимость сопутствующего оборудования (руб.) и срок его службы, годы; $И$ — транспортные издержки в части материальных затрат на перевозки, руб.; $ЗП$ — средняя заработная плата водителя, руб.; $OС$ — средняя за период стоимость нормируемых оборотных средств в расчете на один автомобиль, руб.

Обозначим сумму $И + \frac{C_d}{T_d} + 2KЗП$ через S .

Тогда выражение (4.7б) примет вид

$$E = P / (Ц/T + S + OС), \quad (4.8)$$

где E — в данном случае представляет собой показатель абсолютной экономической эффективности. Он характеризует уровень экономической эффективности технических решений. Выражение (4.8) может быть использовано для сравнения двух и более технических решений.

Экономический эффект от внедрения более эффективного экономического решения может быть оценен по формуле

$$\mathcal{E} = \left[\left(\frac{C_1}{T_1} + S_1 + OC_1 \right) \frac{1}{P_1} - \left(\frac{C_2}{T_2} + S_2 + OC_2 \right) \frac{1}{P_2} \right] \sum_{t=1}^{T^n} P_{\text{нх}}, \quad (4.9)$$

где $P_{\text{нх}}$ — потребность в продукции, производимой рассматриваемой техникой (в нашем случае транспортными средствами) в i -м году; $t = \overline{1, T^n}$ — плановый период времени, на который рассчитано производство техники, годы. Индексы 1 и 2 в выражении (4.9) указывают на варианты сравниваемых технических решений.

Если капитальные вложения в подвижной состав (стоимость подвижного состава) меняются по годам, а также тогда, когда текущие издержки не постоянны во времени, следует, как это предусмотрено существующей Методикой [26], учесть фактор времени путем приведения к началу расчетного года единовременных и текущих затрат.

Выражение (4.9) может быть записано также в виде

$$\mathcal{E} = \left[\left(\frac{C_1}{T_1} + S_1 + OC_1 \right) \frac{P_2}{P_1} - \left(\frac{C_2}{T_2} + S_2 + OC_2 \right) \right] A_2, \quad (4.10)$$

где A_2 — потребность народного хозяйства в транспортных средствах второго вида в плановом периоде.

Полученные выражения (4.9) и (4.10) могут быть применены для оценки эффективности использования новой техники, в том числе электромобилей. По мнению автора они более полно отвечают решению этой задачи, чем существующие.

Вместе с тем, учитывая, что имеется для этих целей утвержденная «Методика определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники», дальнейшие расчеты по оценке области эффективного использования электромобилей будем проводить по указанной методике [26] с помощью выражения (4.1), а также на основе предлагаемого выражения (4.10). Однако прежде проанализируем основные составляющие формул (4.1) и (4.10), предлагаемые рядом авторов для оценки эффективности транспортных средств. Такой анализ позволит выявить факторы, влияющие на эффективность электромобилей, и установить взаимосвязь между ними.

4.2. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Производительность является одним из показателей, характеризующих конструктивное совершенство транспортных средств, но в ней не учитываются затраты на производство и эксплуатацию

транспортных средств, и поэтому она не может являться показателем экономической эффективности. Вместе с тем производительность транспортных средств влияет на транспортные издержки и, следовательно, является одним из факторов, определяющих их эффективность.

Суточную производительность автотранспортных средств, выраженную в тоннокилометрах транспортной работы, рассчитывают по известной формуле

$$P_c = q\gamma\beta l_{cc}, \quad (4.11)$$

где q — номинальная грузоподъемность транспортного средства, т; γ — коэффициент использования грузоподъемности; β — коэффициент использования пробега; l_{cc} — среднесуточный пробег транспортного средства, км.

Величина среднесуточного пробега определяется по формуле

$$l_{cc} = \frac{T_n v_T \beta_{e.g}}{l_{e.g} + t_{п-р} v_T \beta}, \quad (4.12)$$

где T_n — время пребывания в наряде, ч; v_T — среднетехническая скорость движения транспортного средства, км/ч; $l_{e.g}$ — длина ездки с грузом, км; $t_{п-р}$ — среднее время простоя под погрузкой и разгрузкой на одну ездку, ч.

Годовую производительность транспортных средств определяют умножением суточной производительности на календарное количество дней в году и на коэффициент выпуска автомобилей.

Выражения (4.11) и (4.12) позволяют проанализировать факторы, влияющие на производительность электромобилей. Такой анализ дает возможность выявить среди них те факторы, которые оказывают наибольшее влияние на производительность электромобилей или ограничивают ее.

Грузоподъемность транспортного средства. Она определяется в основном назначением транспортного средства, техническими и конструктивными параметрами — мощностью двигателя, размерами грузовой платформы, а также специализацией по видам перевозимых грузов и прочностными характеристиками.

Грузоподъемность существующих электромобилей достигает 11 т. Вместе с тем следует отметить, что грузовые электромобили создаются, как правило, для осуществления перевозок мелких партий грузов городским транспортом. Это определяет их рациональную грузоподъемность, ранее приведенную в табл. 1.3. Согласно табл. 1.9 и 4.1 такие электромобили не уступают по данному параметру аналогичным автомобилям с ДВС и в сфере указанных перевозок могут рассматриваться как альтернативные.

Коэффициент использования грузоподъемности. На этот коэффициент оказывают влияние такие факторы, как номенклатура перевозимых грузов, способ укладки грузов в кузове автомобилей, особенности конструкции грузовой платформы.

Коэффициент использования грузоподъемности можно определить с помощью выражения

$$\gamma = Shu/q,$$

где S — площадь платформы кузова, m^2 ; h — высота укладки груза, m ; u — объемная масса груза, t/m^3 .

Согласно этому выражению можно утверждать, что при одинаковой конструкции автомобиля и электромобиля и при одноклассовых перевозимых грузах коэффициент использования грузоподъемности для них не будет различаться.

Длина ездки и расстояние перевозки груза. Для характеристики расстояния перемещения грузов и транспортных средств при работе на автомобильном транспорте используют понятия расстояние перевозки груза и длина ездки.

Длина ездки характеризует расстояние, на которое перемещается подвижной состав при перевозке грузов.

Расстояние перевозки характеризует перемещение каждой тонны груза.

Их средние величины совпадают по своему значению в тех случаях, когда грузы перевозятся с разной нагрузкой в одну ездку на одинаковые расстояния или с одинаковой нагрузкой в одну ездку, но на разные расстояния. Длина ездки и расстояние перевозки определенным образом взаимосвязаны. В связи с этим остановимся лишь на характеристике показателя длина ездки с грузом, входящим в выражение (4.11) для расчета производительности транспортных средств.

Известно, что длина ездки с грузом зависит от расстояния между грузообразующими и грузопоглощающими точками. Изменение последнего происходит при смене клиентуры. В связи с этим можно сделать вывод, что конструктивные особенности транспортных средств (при прочих равных условиях) не влияют на длину ездки с грузом и расстояние перевозки грузов.

Средняя техническая скорость. Величина средней технической скорости зависит от скоростей, с которыми автомобиль проходит различные участки пути, а также от числа кратковременных остановок по условиям регулирования движения.

Величина скорости, с которой автомобиль движется на отдельных участках пути, определяется дорожными условиями (тип и состояние дорожного покрытия, профиль дороги, ширина проезжей части и т. п.), климатическими условиями, интенсивностью движения транспортного потока.

В условиях интенсивного городского потока скорость движения автомобильных транспортных средств определяется уже не его динамическими качествами, а скоростью движения потока. Выше было отмечено, что электромобили в настоящее время достаточно хорошо вписываются в транспортный поток городов.

Время простоя под погрузкой и разгрузкой. На величину времени простоя под погрузкой и разгрузкой влияют такие факторы,

как грузоподъемность подвижного состава, его специализация, способ производства погрузо-разгрузочных работ (ручной, механизированный, полумеханизированный), род перевозимых грузов, вид тары. Кроме того, на его величину влияет время маневрирования при установке транспортного средства под погрузку и разгрузку, взвешивание и пересчет штучного груза, укладка, увязывание и распаковка груза, укрытие брезентом и снятие его в местах прибытия, оформление сопутствующей товарно-транспортной документации.

На время простоя под погрузкой и разгрузкой в значительной степени влияют простои в ожидании работ по погрузке и разгрузке.

Следует заметить, что перечисленные выше факторы не зависят от привода транспортного средства и, следовательно, время простоя под погрузкой и разгрузкой (при прочих равных условиях) будет одинаковым для автомобилей и электромобилей.

Это время для электромобилей может быть использовано для подзарядки источников тока.

Коэффициент использования пробега. Величина этого коэффициента зависит от территориального расположения грузообразующих и грузопоглощающих точек, а также от организации маршрутов, характера грузопотоков (односторонние, двусторонние), рода перевозимых грузов (при двусторонних перевозках).

Учитывая изложенное, можно заключить, что коэффициент использования пробега для автомобилей и электромобилей не будет отличаться при работе в равнозначных условиях.

Коэффициент выпуска. Этот коэффициент для отдельного автомобиля (электромобиля) определяется как отношение дней работы к дням пребывания транспортного средства в хозяйстве. Он зависит от времени нахождения транспортного средства в ремонте, техническом обслуживании и от простоев по организационным причинам. Величина последних, в принципе, не зависит от того, автомобиль или электромобиль используется при перевозках.

Что касается времени простоя транспортных средств в ремонте и при техническом обслуживании, то переход к использованию электромобилей требует ряда новых технических средств и новой организации обслуживания. Можно в целом определить это понятие уровень технической культуры обслуживания. Сюда, в частности, относятся испытательно-диагностические стенды для контроля электрической и электронной аппаратуры, специальные стенды технического обслуживания аккумуляторных батарей (заряд, доразряд, контрольные циклы, доливка электролита, контроль герметичности) и т. д.

При должном уровне технической культуры обслуживания коэффициент выпуска электромобилей будет не ниже, чем у однотипных автомобилей.

Время пребывания в наряде. Среднесуточный пробег. Время пребывания транспортных средств в наряде зависит от режима

работы предприятий и организаций, обслуживаемых автотранспортными предприятиями, срочности и объема перевозок.

Для современных электромобилей время пребывания в наряде ограничено также продолжительностью функционирования аккумуляторных батарей. Сказанное в полной мере относится к среднесуточному пробегу электромобилей, который функционально зависит от времени в наряде и ограничен запасом хода.

Из выражений (4.11) и (4.12) следует, что зависимость между временем в наряде, среднесуточным пробегом и, следовательно, запасом хода прямо пропорциональная, т. е. каждый процент роста запаса хода ведет к такому же увеличению производительности электромобиля.

Ранее было показано, что запас хода электромобилей, хотя и имеет тенденцию к постоянному увеличению, все же является в настоящее время значительно ограниченным.

Поэтому целесообразно более подробно остановиться на данном показателе; выявить факторы, влияющие на него; определить возможности увеличения запаса хода как в настоящее время, так и в перспективе.

Запас хода электромобилей. В настоящее время нет единой методики расчета запаса хода электромобилей. Иногда для этих целей используется выражение

$$L = eG_{\text{Б}} / (\omega G_{\text{э}}), \quad (4.13)$$

где $G_{\text{э}}$ — полная масса электромобиля, включая массу перевозимого груза, кг (т); $G_{\text{Б}}$ — масса батареи аккумуляторов, кг (т); e — удельная энергоемкость источника тока, Вт·ч/кг (кВт·ч/кг); ω — удельный расход энергии (затраты энергии) на перемещение каждого килограмма (тонны) массы электромобиля на километр пути, Вт·ч/(кг·м) [кВт·ч/(тк·м)].

Это выражение встречается и в других вариантах записи, например, когда в числителе формулы находится показатель «энергия аккумуляторной батареи». Достоинством такого выражения является его простота и небольшая трудоемкость расчетов.

Следует отметить недостатки формулы (4.13), в которой не учитывается, что величина энергоемкости аккумуляторной батареи в значительной степени зависит от режима и интенсивности разряда, степени заряженности и типа источника тока. Удельные затраты энергии на перемещение электромобиля зависят от ряда факторов как конструктивного, так и эксплуатационного характера.

Группой ученых Ереванского политехнического института для расчета запаса хода предлагается выражение

$$L = v \left(\frac{aQ^{\text{н}}\eta}{P_{\text{т}}} \right)^{\frac{1}{1-b}}, \quad (4.14)$$

где v — скорость движения электромобиля, км/ч; a и b — коэффициенты, зависящие от типа аккумуляторной батареи; Q — номинальная (транспортная) энергоемкость аккумуляторной батареи, кВт·ч; η — КПД преобразования электрической энергии в механическую энергию тяги; P_T — среднее значение тяговой мощности, кВт·ч, величину которой предлагается рассчитывать по формуле

$$P_T = 2,72v \left(Gf + \frac{kF}{13 \cdot 10^3} v^2 \right), \quad (4.15)$$

где f — коэффициент сопротивления качению; k — коэффициент обтекаемости электромобиля, $\text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{М}^4$; F — площадь лобового сечения электромобиля, м^2 .

Нетрудно заметить, что предлагаемое выражение может быть использовано лишь для расчетов запаса хода электромобилей, движущихся с постоянной скоростью.

Д. Поляком для расчетов запаса хода электрических автомобилей была предложена зависимость

$$L = \frac{G_B \cdot 10^3}{G_3 e' (w' + mv^2)} \sqrt[n-1]{\frac{200 G_B}{G_3 e' v (w' + mv^2)}}, \quad (4.16)$$

где w' — затраты электрической энергии на преодоление силы сопротивления качению, кВт·ч/(тк·м); m — расход энергии на преодоление силы сопротивления воздуха, отнесенный к тонно-километру общей массы электромобиля и квадрату скорости движения; e' — величина, обратная удельной энергоемкости источника тока, т/(кВт·ч).

Можно убедиться в том, что формулы (4.14) и (4.16) — это две различные записи одного и того же выражения. Действительно, введя обозначения $b = 1/n$ и преобразовав показатель степени (4.14) к виду $\frac{1}{1-b} = 1 + \frac{1}{n-1}$, запишем первую зависимость так:

$$L = \frac{aQ}{2,72G_3 \left(\frac{f}{\eta} + \frac{kFv^2}{13G_3\eta} \right)} \sqrt[n-1]{\frac{aG_B e}{\left[2,72G_3 \left(\frac{f}{\eta} + \frac{kFv^2}{13 \cdot 10^3 G_3 \eta} \right) \right]}}. \quad (4.17)$$

Сравнив выражения (4.17) и (4.16), а также учитывая, что имеют место следующие соотношения $eG_B = Q$, $kF/(G_3\eta) = m$, $f/\eta = w'$, можно сделать вывод об их тождественности. В связи с этим отмеченный выше недостаток полностью распространяется на выражение (4.16). Чтобы его устранить, автором предлагается для случаев движения электромобилей с переменной скоростью ввести поправочный коэффициент, рассчитываемый на основе разрядных характеристик источника тока. Использование такого коэффициента вызывает ряд трудностей, обусловленных тем, что входящие в него величины могут быть определены только после

ходовых испытаний электромобилей или путем довольно сложных теоретических расчетов.

А. Б. Козловским и А. И. Яковлевым для расчетов запаса хода электромобилей предлагается зависимость

$$L = \frac{m_3 k_B \eta_{эл} \beta_{всп} \gamma}{0,277 \left\{ m_3 \left[q (f + i) \left(1 - \frac{v^2}{26 a_T L_{п}} \right) + \frac{v_T^2 \delta}{26 L_{п}} \right] + 0,0492 k F v_{\max}^2 \left(1 - \frac{v^2}{26 a_T L_{п}} \right) \right\}} \quad (4.18)$$

В формуле (4.18), кроме ранее введенных обозначений, приняты: m_3 — масса электромобиля, кг; v_{\max} — максимальная скорость электромобиля на участке расчетного цикла движения, м/с; a_T — средняя величина замедления электромобиля, м/с; γ и $\beta_{всп}$ — коэффициенты, учитывающие допустимый уровень разряда батареи и расход энергии на вспомогательные нужды; v_T — начальная скорость торможения, км/ч; $\eta_{эл}$ — средний КПД электропривода; $L_{п}$ — длина расчетного цикла движения на перегоне, м; k_B — отношение массы батареи к массе электромобиля.

Громоздкость выражения (4.18) и сложность использования его для расчетов запаса хода электромобилей очевидны.

В п. 3.4 в основу исследования энергетики электромобиля был положен метод баланса энергии при движении. Составляющие этого баланса показаны на энергетической диаграмме (рис. 3.11) и в виде зависимости (3.19).

Полученные в третьей главе оценки энергетических характеристик относятся к двум основным режимам движения: движению с постоянной скоростью; движению по стандартному циклу «С».

Эти результаты важны для сравнения различных типов тяговых систем и источников тока. Однако существует и другая задача: определение реального запаса хода при нестандартном режиме движения и различных дорожных условиях.

Учитывая особенности такой постановки задачи, запишем формулу энергетического баланса (3.19) в следующем виде:

$$Q \eta_{т.с} = W_k + W_B + W_j + W'_k \quad (4.19)$$

где $\eta_{т.с}$ — КПД тяговой системы;

$W_k = \frac{G_3 f L}{3,6 \cdot 10^2}$ — затраты на преодоление сил сопротивления качению и подъему, Вт·ч;

$W'_k = \frac{G_3 f L_T}{3,6 \cdot 10^2}$ — то же, но при движении электромобиля в режиме торможения и движения накатом, Вт·ч;

$W_B = \frac{k F v_{р.к} a L}{3,6 \cdot 10^3}$ — затраты энергии на преодоление силы сопротивления воздуха на участках разгона и равномерного движения, Вт·ч;

$W_j = \frac{G\delta_j L_p}{g \cdot 3,6 \cdot 10^3}$ — энергия, затрачиваемая на преодоление силы сопротивления инерции, Вт·ч;

$a = 1 - L_T/L_c$ — доля пути, приходящаяся на разгон и равномерное движение;

L_T — путь, проходимый электромобилем в режиме торможения и накатом, м;

f — коэффициент сопротивления дороги;

L — общая длина пути, м;

$v_{p.k}$ — средняя скорость на участках разгона и равномерного движения, м/с;

L_p — путь, проходимый электромобилем с ускорением, м;

b — доля пути, проходимая электромобилем с ускорением.

После несложных преобразований выражение для расчета запаса хода электромобилей запишется в виде

$$L = \frac{Q\eta_{эл}\gamma \cdot 3,6 \cdot 10^3}{G_3 a \left(\psi + \frac{kFv_{p.k}^2}{10G_3} + \frac{idb}{ga} \right)}. \quad (4.20)$$

Зная режим движения и выбрав расчетный цикл, можно определить запас хода электромобиля с помощью полученной зависимости. При этом результаты расчетов хорошо согласуются с данными ходовых испытаний электромобилей.

Рассмотрим пример. Предположим, что необходимо определить запас хода электромобиля ВАЗ-21029 с аккумуляторной батареей 84НЦ-125 при движении с постоянной скоростью и в режиме испытательного цикла *SAEj 227a «C»* (см. рис. 3.19). Технические характеристики электромобиля и источника тока приведены ниже.

Число мест	2
Полная масса электромобиля, кг	1620
Энергоемкость источника тока, кВт·ч:	
при движении с постоянной скоростью 40 км/ч	26
» » в режиме <i>SAEj 227a «C»</i>	28,6
Энергетический КПД ($\eta_{эл} \gamma$):	
при движении с постоянной скоростью 40 км/ч	0,502
» » в режиме <i>SAEj 227a «C»</i>	0,436
Коэффициент учета вращающихся масс	1,01
Габаритные размеры, м:	
ширина	1,6
высота	1,85
Коэффициент обтекаемости электромобиля, $H \cdot c^2/m^4$	0,3

Выше даны различные значения энергоемкости источника тока в связи с необходимостью дальнейшего сопоставления расчетных значений запаса хода с результатами ходовых испытаний, при которых зафиксирован различный уровень заряженности аккумуляторных батарей, составляющий соответственно 26 и 28,6 кВт·ч.

Результаты расчетов приведены в табл. 4.1.

Данные о ходовых испытаниях и расчетные значения запаса хода
электромобиля ВАЗ-21029

Показатель	Результаты ходовых испытаний	Результаты расчетов	Погрешность расчетов, %
Параметры расчетного цикла SAEj 227a «С»:			
длина расчетного участка пути, м	500		—
путь, проходный электромобилем с ускорением, м	126,7		—
путь, проходный в режиме торможения и накатом, м	106,6		—
Коэффициент сопротивления качению	0,014		—
Доля пути, приходящаяся на разгон и равномерное движение	0,787		—
Доля пути, приходящаяся на ускоренное движение	0,253		—
Ускорение при движении на расчетном участке, м/с ²	—	0,702	—
Средняя скорость на расчетном участке, м/с	—	10,1	—
Запас хода при движении с постоянной скоростью 40 км/ч	138,0	139,1	0,8
Запас хода при движении в режиме цикла SAEj 227a «С», км	82,7	82,1	0,77

Расчеты, приводимые для других источников тока и условий эксплуатации, а также для иной грузоподъемности электромобилей, показали, что погрешность, как правило, не превышает 3 % и зависит от точности оценки параметров, входящих в уравнение (4.20).

Не останавливаясь подробно на расчете запаса хода электромобилей на основе других приведенных зависимостей, отметим, что в их основу также положен энергетический баланс. Наиболее общим является выражение (4.13). В зависимостях (4.14) и (4.16) более полно учтены разрядные характеристики источника тока — зависимость отдаваемой источником энергии от режима разряда батареи аккумуляторов, т. е. от режима движения электромобиля, однако при этом не достаточно полно учтены затраты энергии на перемещение электромобиля. В выражениях (4.18) и (4.20) с более высокой точностью учитываются при расчетах затраты энергии на перемещение электромобиля, но непосредственно не учитываются изменения энергоемкости источника тока в зависимости от режима движения. В связи с этим возникает необходимость пересчитывать величину отдаваемой энергии аккумуляторной батареи в зависимости от условий эксплуатации. Это можно сделать, используя зависимость изменения энергетического КПД источника тока от скорости движения электромобиля, полученную опытным путем.

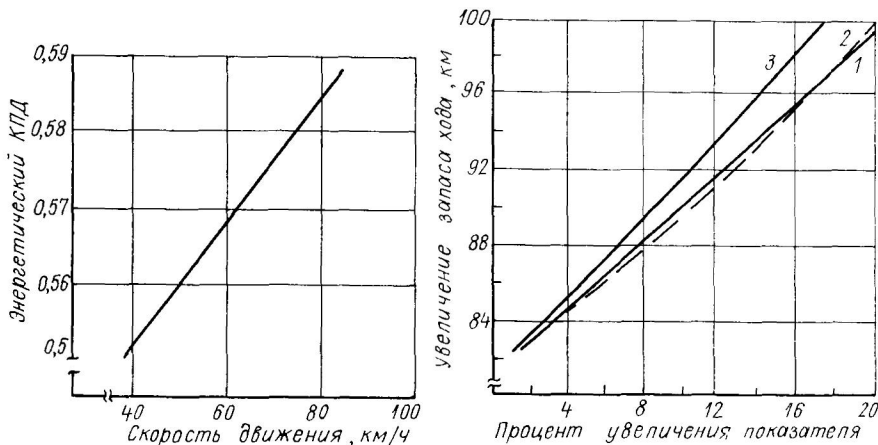


Рис. 4.1. Изменение энергетического КПД аккумуляторных батарей 84 НЦ-125 в зависимости от скорости движения автомобиля

Рис. 4.2. Влияние конструктивных параметров электромобилей на запас хода: 1 — увеличение энергетического КПД и удельной энергоемкости аккумуляторной батареи; 2 — снижение массы автомобиля; 3 — снижение массы батарей и удельных затрат энергии на перемещение автомобиля

На рис. 4.1 в качестве примера показано изменение энергетического КПД в зависимости от скорости движения автомобиля ВАЗ-21029.

Зависимости для расчета запаса хода электромобилей могут быть использованы для анализа мероприятий по его увеличению. Наиболее удобным для этих целей, по мнению автора, является выражение (4.20).

Все факторы, влияющие на запас хода автомобиля, можно условно подразделить на конструктивные и эксплуатационные. К первой группе следует отнести массу автомобиля, удельную энергоемкость и массу химического источника тока, а также фактор обтекаемости и коэффициент учета вращающихся масс. Ко второй группе относятся коэффициент сопротивления качению колеса, скорость движения, ускорение и параметры расчетного цикла движения.

Последний фактор — энергетический КПД зависит как от типа источника тока, так и от режима эксплуатации.

На рис. 4.2 показано влияние ряда конструктивных факторов на величину запаса хода автомобиля. При расчетах за основу приняты параметры автомобиля ВАЗ-21029.

Из рисунка следует, что каждый процент роста энергетического КПД и удельной энергоемкости источника тока приводит к пропорциональному увеличению запаса хода автомобиля. Примерно такое же увеличение запаса хода дает каждый процент снижения общей массы автомобиля. Однако зависимость при

этом получилась более сложной. Наиболее весомыми оказались процент снижения массы аккумуляторной батареи и удельных затрат энергии на перемещение электромобиля.

Сопоставление результатов испытаний электромобилей на запас хода и реальных эксплуатационных показателей по пробегу от одной зарядки показывает на очень большие различия в этих данных. Это наглядно иллюстрирует табл. 4.2, представляющая сводку опубликованных данных.

В табл. 4.2 приведены основные технико-эксплуатационные показатели современных автомобилей.

Из таблицы следует, что запас хода существенно различается даже для электромобилей с одинаковыми химическими источниками тока при близких для них технических характеристиках. Например, легковые электромобили 5 и 6 со свинцово-кислотными аккумуляторными батареями имеют одинаковую полезную массу и вместимость, незначительно различающиеся величины максимальных скоростей, однако запас хода электромобиля «Эфилд-8000», разработанного в Англии, в полтора раза ниже, чем у электромобиля шведской фирмы «Вольво».

Для грузовых электромобилей 3 и 7 запас хода отличается примерно в три раза. Очевидно, что такое различие в величине запаса хода обусловлено в данном случае не только конструктивными параметрами электромобилей, которые одинаковы, но также и условиями эксплуатационных испытаний.

Конструктивные параметры электромобилей остаются неизменными в процессе эксплуатации и влияют одинаково на запас хода в каждом цикле движения. Условия эксплуатации могут существенно различаться, что оказывает определяющее влияние на запас хода электромобилей. Это необходимо учитывать при планировании запаса хода электромобилей и их среднесуточного пробега. В связи с этим целесообразно провести анализ влияния эксплуатационных условий на запас хода электромобилей.

Степень различия условий эксплуатации может отразить коэффициент, рассчитываемый по формуле

$$\xi = \frac{1}{a \left(\psi + \frac{kFv^2}{10G_0} + \frac{\delta j b}{ga} \right)}. \quad (4.21)$$

Назовем величину $r = 100 - \xi$ коэффициентом условий эксплуатации.

Чем тяжелее условия эксплуатации, т. е. выше скорости движения и чаще затяжные подъемы, тем больше величина указанного коэффициента.

В благоприятных условиях эксплуатации при равномерном движении по ровному шоссе и невысокой установленной скорости затраты энергии на преодоление силы инерции равны нулю, а на преодоление силы сопротивления воздуха — незначительны.

Технико-эксплуатационные показатели электромобилей

Модель, фирма, страна	Полная (снаряженная) масса, кг	Полезная нагрузка, кг (местность, чел.)	Максимальная скорость, км/ч	Запас хода, км	Запас энергии, кВт.ч	Тип аккумуляторной батареи, масса, кг	Коэффициент жесткости эксплуатации
Легковые электромобили							
1. «Коппер» (<i>Copper</i>), «Коппер девелопмент» (<i>Copper Development</i> , США)	1339	2	89	193	16,4 *	Свинцово-кислотные, 574	8,97
2. EVIN, «Дейхацу» (<i>Deihatsu</i> , Япония)	1427	4	101	300	42,4	Железо—воздух, 510	41,4
3. «Дельта II», (<i>Delta II</i>), «Дорнир» (<i>Dornier</i> , ФРГ)	1246	2	60	60	12	Свинцово-кислотные, 400	64,0
4. «Фокус» (<i>Focus</i>), «Фиат», Италия	1550	4	80	60—90	14,4 *	Свинцово-кислотные, 480,5	62,7—44,2
5. «Электро» (<i>Electro</i>), «Вольво» (<i>Volvo</i> , Швеция)	1000	2	70	120	9 *	Свинцово-кислотные, 300	22,9
6. «Эфилд-8000», Англия	1000	2	65	65	5,28	Свинцово-кислотные	12,4
7. «Дейхацу Кого», Япония	1128	400 + 2 чел.	35—40	96	16,8	— Свинцово-кислотные, 640	38,2
Грузовые электромобили							
1. «Тип-400» (ITAJ PVE-400), «Гургей» (<i>Gurgei</i> , Бразилия)	1870	400 + 2 чел.	35—40	96	16,8	То же	38,2

Модель, фирма, страна	Полная (снаряженная) масса, кг	Полезная нагрузка, кг (местность, чел.)	Максимальная скорость, км/ч	Запас хода, км	Запас энергии, кВт.ч	Тип аккумуляторной батареи, масса, кг	Коэффициент жесткости эксплуатации
2. S60-TSD03, «Дейхацу» (<i>Deihatsu</i> , Япония)	1700	350 + 2 чел.	70	35—55	9,6	Свинцово-кислотные, 465	64,2—43,7
3. «СТ20ЕВ Сузуки» (ST20EB <i>Suzuki</i>), «Сузуки» (<i>Suzuki</i> , Япония)	1900	500 + 2 чел.	60	90	14,4	Свинцово-кислотные, 370	31,4
4. 900E/E2, «Фиат»	1870	500	70	70—100	17,8	Свинцово-кислотные, 480	57,4—39,1
5. S60V-D03, «Дейхацу», Япония	1575	250 + 2 чел.	65	40—60	17,8	Свинцово-кислотные, 370	74,1—62,0
6. «4Ф6 Рено» (4F6 <i>Renault</i>), «Реио» (<i>Renault</i> , Франция)	1495	300	60	60—80	17,3	Свинцово-кислотные	70—60
7. — «Круман» (<i>Crumen</i> , США)	1516	320	78	28	13,2	Свинцово-кислотные 440	81,4
8. — «Лукас-Бедфорд», Англия	3500	1000	80	80—96	30	Свинцово-кислотные, 1000	25,8
9. «Модель j-7», «Пежо» (<i>Peugeot</i> , Франция)	3500	900	80	60—90	36,4	То же	66,7—50,0
10. — «Дейли Электрик» (<i>Daily Electric</i> , Франция)	2500	870	70	94	38,9	»	51,1

* Рассчитано, исходя из удельной энергоемкости аккумуляторной батареи 30 Вт.ч/кг.

В этих условиях коэффициент условий эксплуатации равен

$$r = 100 - 1/f. \quad (4.22)$$

Величина коэффициента сопротивления качению при движении по асфальтобетонному шоссе, находящемся в хорошем состоянии, может быть не выше 0,012.

Тогда

$$\xi = \frac{1}{0,012} = 83,5; \quad r = 100 - 83,5 = 16,5.$$

При высоком давлении воздуха в шинах и ровном асфальтобетонном покрытии дороги коэффициент сопротивления качению приближается к величине 0,01. Тогда коэффициент условий эксплуатации равен нулю. Таким образом, жесткость условий эксплуатации можно оценивать по стобальной шкале.

В технической литературе, как правило, не содержатся сведения о режимах и условиях испытаний электромобилей, что затрудняет расчеты по формуле (4.21). Чаще всего приводятся данные о массе электромобилей, запасе хода, типе, массе и энергоемкости источника тока. В связи с этим, учитывая тождество

$$\frac{1}{a \left(f + \frac{kFv_{p.н}}{10G_0} + \frac{\delta j}{g} \frac{b}{a} \right)} = \frac{G_0 L}{3,6 \cdot 10^2 Q_{\eta.с}}, \quad (4.23)$$

запишем другое выражение для расчета условий эксплуатации

$$r = 100 - \frac{G_0 L}{3,6 \cdot 10^2 Q_{\eta.с}}. \quad (4.24)$$

Предположим, что необходимо оценить условия эксплуатации электромобиля ВАЗ-21029 при движении с постоянной скоростью 40 км/ч и при движении в режиме испытательного цикла *SAEj 227a «С»*. Исходные данные приведены в табл. (4.1).

В первом случае коэффициент условий эксплуатации будет равен

$$r = 100 - \frac{1620 \cdot 138\,000}{3,6 \cdot 100 \cdot 26\,000 \cdot 0,502} = 52,42.$$

Во втором случае

$$r = 100 - \frac{1620 \cdot 82\,700}{3,6 \cdot 1000 \cdot 28\,600 \cdot 0,436} = 70,7.$$

Расчеты показывают, что при движении в режиме *SAEj 227a «С»*, имитирующем городские транспортные потоки, жесткость условий эксплуатации примерно на 35 % выше, чем при движении с постоянной скоростью 40 км/ч.

В табл. 4.2 в последней графе приведены оценки расчетов коэффициента жесткости условий эксплуатации, в которых проходили испытания электромобили на пробег.

Из таблицы следует, что условия испытаний электромобилей были весьма разнообразными. Так, легковые электромобили 1 и 6 проходили испытания в легких условиях, т. е. вероятнее всего на ровном и в хорошем состоянии шоссе при движении с небольшой постоянной скоростью. Для ряда других электромобилей (в том числе электрофургонов 5, 6 и 7) характерны достаточно жесткие условия испытаний, близкие к городским режимам движения.

Коэффициенты условий эксплуатации могут быть использованы также для сопоставления пробегов электромобилей в различных режимах работы. Чтобы оценить, как изменится пробег электромобиля при переходе от одних условий эксплуатации к другим, можно использовать следующие выражения;

$$L_{\text{н}} = L_{\text{б}} \frac{Q_{\text{н}} \eta_{\text{т. н}} (100 - r_{\text{н}})}{Q_{\text{б}} \eta_{\text{т. б}} (100 - r_{\text{б}})}; \quad (4.25)$$

$$L_{\text{н}} = L_{\text{б}} \frac{Q_{\text{н}} \eta_{\text{т. н}} \xi_{\text{н}}}{Q_{\text{б}} \eta_{\text{т. б}} \xi_{\text{б}}}, \quad (4.26)$$

где $L_{\text{б}}$, $\eta_{\text{т. б}}$, $Q_{\text{б}}$ — соответственно, запас хода, КПД тяговой системы и энергоемкость источника тока при эксплуатации в прежних условиях, для которых коэффициент условий равен $r_{\text{б}}$; $L_{\text{н}}$, $\eta_{\text{т. н}}$, $Q_{\text{н}}$ — расчетный запас хода, КПД тяговой системы и запас энергии батареи в расчетных условиях эксплуатации с коэффициентом $r_{\text{н}}$.

Предположим, что необходимо оценить запас хода электромобиля ВАЗ-21029 в городских условиях эксплуатации (расчетный цикл движения *SAEj 227a «С»*, $r = 70,7$ ед.), если известны лишь данные о пробеге электромобиля с постоянной скоростью 40 км/ч (см. табл. 4.1), а также то, что при работе в новых условиях запас энергии составит 28,6 кВт·ч, а $\eta_{\text{т. н}} = 0,436$.

Тогда планируемый пробег в километрах будет

$$L_{\text{н}} = \frac{138 \cdot 28,6 \cdot 0,436 \cdot 29,3}{26 \cdot 0,502 \cdot 47,58} = 81,2.$$

Отклонение расчетной величины в процентах от данных, полученных при испытании электромобиля по циклу *SAEj 227a «С»*, составит

$$\mu = \frac{82,7 - 81,2}{82,7} 100 = 1,8.$$

Таким образом, с помощью предлагаемых коэффициентов можно сопоставить запас хода электромобилей, проходивших эксплуатацию в различных условиях, или привести его к единой базе сравнения. На рис. 4.3 показано изменение запаса хода электромобилей различных лет производства с учетом различия в условиях эксплуатации и без их учета.

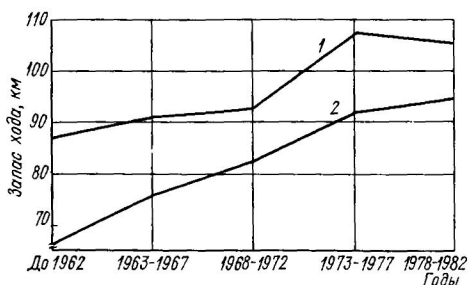


Рис. 4.3. Средний запас хода электромобилей (1) и средний запас, приведенный к условиям эксплуатации 60 ед. (2)

же, т. е. приводимые в технической литературе данные о запасе хода часто завышены. Вместе с тем имеется тенденция к сближению кривых. Это свидетельствует о том, что в последнее время все чаще данные об испытаниях и эксплуатации электромобилей приводятся для условий, близких к городским.

На рис. 4.4 представлены гистограммы распределения опытных образцов аккумуляторных электромобилей, созданных за последние 15—20 лет, согласно их условиям эксплуатации, которые характеризуются коэффициентом r .

Из рисунка следует, что наиболее распространенными условиями испытаний и эксплуатации легковых электромобилей являются средние от 40 до 80 ед., для грузовых — от 30 до 70 ед. и электробусов от 20 до 50 ед. коэффициента условий эксплуатации r .

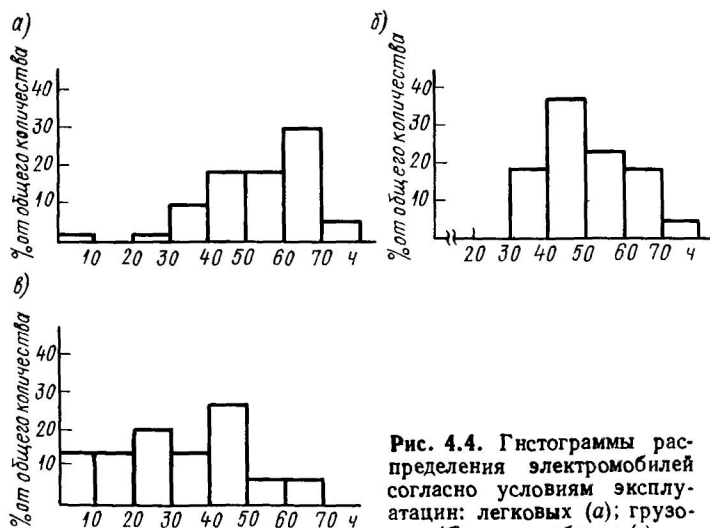


Рис. 4.4. Гистограммы распределения электромобилей согласно условиям эксплуатации: легковых (а); грузовых (б); электробусов (в)

Таким образом, предлагаемые коэффициенты могут найти широкое использование как при теоретических исследованиях, так и при практических расчетах.

Однако нужно отметить, что на указанные коэффициенты оказывают определенное влияние конструктивные параметры электромобилей, т. е. такие, как масса электромобилей, фактор объема и коэффициент учета вращающихся масс. Для электромобилей, близких по своим конструктивным параметрам, это влияние незначительно. Сказанное справедливо для легковых электромобилей, грузовых, близких по грузоподъемности, а также для электробусов, близких по вместимости.

При пробеге электромобилей различных групп, например легковых и электробусов, в одинаковых условиях и режиме предлагаемый коэффициент будет отличаться. Это различие может достигать 10 ед. В связи с этим данный коэффициент является относительным. Чтобы перейти к абсолютному коэффициенту условий эксплуатации, необходимо ввести поправочные коэффициенты отдельных групп электромобилей. Тогда жесткость условий эксплуатации будет определяться произведением относительного коэффициента условий эксплуатации r на указанный коэффициент по данной группе электромобилей k , т. е.

$$r_{абс} = rk. \quad (4.27)$$

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ ПО КРИТЕРИЮ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ

Производительность электромобилей может быть определена с помощью выражения (4.11).

Для аккумуляторных электромобилей грузоподъемность, запас хода и масса аккумуляторной батареи в значительной степени взаимосвязаны.

Представим массу электромобиля в виде суммы ее составляющих:

$$G_0 = G_{ш} + G_B + q, \quad (4.28)$$

где G_0 — масса электромобиля с грузом (полная масса электромобиля), кг (т); $G_{ш}$ — масса снаряженного электромобиля без аккумуляторной батареи, кг (т); G_B — масса батареи, кг (т).

Увеличение грузоподъемности электромобиля при неизменной общей массе ведет к снижению массы аккумуляторной батареи и, следовательно, запаса хода. В связи с этим важно правильно выбрать соотношение между массой батареи и величиной грузоподъемности электромобиля, при котором производительность была бы максимальной.

Представим грузоподъемность электромобиля в виде разности

$$q = G_0 - G_B,$$

Реальная и максимально возможная производительности электромобилей

Модель, фирма, страна	Полная масса, т	Грузоподъемность, т	Запас хода, км	Батарея		Производительность	
				Масса, т	Энергоемкость, кВт.ч	Максимальная, т.км	реальная, т.км
1. «Лукас» (Lucas), Лукас, Англия	3,5	1,0	112	0,9975	38	112	
2. То же, «Мессершмит» «Messerschmitt», ФРГ	3,3	0,9	60	0,8679	26	54,02	54,00
3. То же, Ниссан Моторс (Nissan Motors), Япония	3,347	1,0	90	0,974	55,4	90,01	90,0
4. ST20EB, «Сузуки», Япония	1,900	0,5	90	0,370	14,4	46,02	45,0
5. P-500, «Отис», США	1,8	0,35	65	0,4	14,4	23,5	23,4
6. ВАЗ-2801, СССР	1,475	0,2	80	0,386	—	17,8	16,0
7. ВАЗ-28021, СССР	1,663	0,3	67	0,405	—	20,6	20,1
8. ВАЗ-2709, СССР	1,57	0,430	70	0,400	—	30,13	30,1
9. УАЗ-451М, СССР	2,87	0,5	40 *	0,690	—	20,5	20,0
10. НАМИ-0189Э, СССР	2,975	1,0	70	0,71	—	72,1	70,0

* При Европейском ездовом цикле.

где

$$G_0 = G_3 - G_{ш}.$$

Тогда, учитывая зависимость (4.13), производительность электромобиля в тоннокилометрах можно определить с помощью выражения

$$P = \gamma\beta \left(G_0 L - \frac{\omega G_3}{e} L^2 \right). \quad (4.29)$$

Экстремум данной зависимости можно определить, приравняв первую производную последнего выражения к нулю. В этом случае получим

$$L = G_0 e / (2\omega G_3). \quad (4.30)$$

Знак второй производной меньше нуля, следовательно, в точке экстремума функция имеет максимум.

Нетрудно убедиться, что максимального значения производительность электромобиля достигает при массе батареи

$$G_B = (G_3 - G_{ш})/2. \quad (4.31)$$

В табл. 4.3 приведены расчеты производительности электромобилей, созданных в СССР и за рубежом для параметров, которые даны в технической характеристике и рассчитаны с помощью

выражений (4.30) и (4.31), позволяющих достичь ее максимального значения.

Из таблицы следует, что современные грузовые электромобили имеют такие соотношения параметров массы, при которых производительность близка к максимально возможной.

4.3. СЕБЕСТОИМОСТЬ ПЕРЕВОЗОК

Себестоимость перевозок — это стоимостное выражение издержек, возникающих при доставке грузов у транспортных предприятий и организаций.

Различают общую себестоимость, т. е. сумму транспортных издержек на перевозки грузов, а также себестоимость единицы (или 10 единиц) транспортной продукции.

За единицу транспортной продукции на автомобильном транспорте в настоящее время принят тоннокилометр полезной работы грузовых автомобилей, а для пассажирских перевозок — пассажирокилометр.

В себестоимости перевозок на автомобильном транспорте обычно выделяют следующие статьи: заработную плату водителей и кондукторов с начислениями на социальное страхование; затраты на автомобильное топливо; затраты на смазочные и другие эксплуатационные материалы; затраты на ремонт и восстановление автомобильных шин; затраты на техническое обслуживание и ремонт подвижного состава; амортизационные отчисления на восстановление и капитальный ремонт автомобилей; накладные расходы (административно-хозяйственные, общепарковые и затраты на содержание вышестоящей организации).

В статьях себестоимости перевозок, осуществляемых электромобилями, имеются изменения, обусловленные прежде всего применением на них других источников энергии по сравнению с автомобилями. Статья «автомобильное топливо» при использовании аккумуляторных электромобилей заменяется на статью «электроэнергия для электромобилей».

В связи с различиями в сроке службы источников тока и электромобиля, а также высокой его ценой отдельно выделяется статья «амортизационные отчисления по батарее аккумуляторов».

Иногда (в целях анализа) отдельной статьей выделяют затраты на техническое обслуживание и ремонт источника тока.

Что же касается остальных статей себестоимости перевозок электромобилей, то они по своему содержанию совпадают с общепринятыми на автомобильном транспорте. В то же время их величины могут существенно отличаться от статей себестоимости для автомобильных перевозок.

Ниже для сравнения приведена структура себестоимости перевозок в процентах на электромобилях небольшой грузоподъемности (0,3—0,4 т); при этом себестоимость перевозок на автомобилях с ДВС принята за 100 %.

Топливо, электроэнергия	10—12
Эксплуатационные материалы (с учетом материалов на обслуживание аккумуляторной батареи)	400—600
Ремонт и восстановление авторезины	70—120
Техническое обслуживание и ремонт подвижного состава	70—90
Амортизационные отчисления на восстановление и капитальный ремонт электромобилей (без аккумуляторной батареи)	60—80
Накладные расходы	67—85
Заработная плата водителей с начислениями на социальное страхование	100

Выше не указаны амортизационные отчисления на батарею аккумуляторов электромобиля, величина которых достигает 30 и более процентов от всех эксплуатационных затрат в себестоимости перевозок.

На величину амортизационных отчислений и, следовательно, себестоимость перевозок аккумуляторных электромобилей в значительной степени влияют технические характеристики источника тока, в том числе удельная стоимость, срок службы, масса и др.

Большинство из параметров источника тока — удельная стоимость, срок службы, КПД и другие являются сравнительно постоянными величинами и одинаково влияют на себестоимость перевозок в каждом цикле эксплуатации. Более сложное влияние оказывает на себестоимость перевозок масса аккумуляторной батареи. Ее увеличение влечет рост амортизационных отчислений. Однако, с другой стороны, увеличивается запас хода и объем транспортной продукции, производимой в единицу времени, что способствует снижению себестоимости перевозок. Очевидно имеет место оптимум запаса хода и массы аккумуляторной батареи. Чтобы его выявить при анализе себестоимости перевозок, будем условно считать, что запас хода электромобилей возрастает за счет увеличения массы аккумуляторной батареи.

Зависимость массы источника тока от требуемой величины запаса хода электромобиля имеет вид

$$G_B = G_p L / (\rho - L), \quad (4.32)$$

где G_p — расчетная масса электромобиля, т. е. масса груженого электромобиля за вычетом массы источника тока, т; ρ — отношение удельной энергоемкости источника тока к удельным затратам на перемещение электромобиля, т. е. $\rho = e/w$.

Справедливость данного выражения подтверждается следующими положениями. При требуемом запасе хода L электромобиля с расчетной массой G_p требуется энергия аккумуляторной батареи массой $G_p L / \rho$, для перемещения которой необходима энергия дополнительной батареи $G_p (L/\rho)^2$. Однако указанное приращение требует дальнейшего увеличения массы аккумуляторной батареи теперь уже на ее перемещение и т. д., т. е. с математической точки зрения имеем бесконечно убывающую прогрессию

со свободным членом $G_p L / \rho$ и знаменателем прогрессии L / ρ . В итоге получаем выражение (4.32).

Заметим, что указанное выражение может быть получено путем преобразования зависимости (4.13). Действительно, записав массу электромобиля в виде расчетной массы и массы источника тока, а затем из данного выражения определив запас хода, получим зависимость (4.32).

Эксплуатационные затраты автотранспортных предприятий обычно подразделяют на постоянные (независящие или незначительно зависящие от пробега транспортных средств) и переменные (зависящие в основном от пробега). В этом случае общую сумму эксплуатационных затрат можно определить по формуле

$$C = C_{\text{пост}} + C_{\text{пер}} L, \quad (4.33)$$

где $C_{\text{пост}}$ — постоянные затраты, руб.; $C_{\text{пер}}$ — переменные затраты, руб./км; L — пробег транспортных средств, км.

К постоянным затратам относят накладные расходы и условно заработную плату водителей и кондукторов с начислениями на социальное страхование. Все прочие затраты относят к группе переменных.

Если учесть, что для электромобилей эксплуатационные затраты (амортизация источника тока, затраты на его обслуживание и другие) зависят от удельной стоимости, массы источника тока, количества циклов работы, то в целях упрощения расчетов их целесообразно выделить из общей суммы и рассматривать как функцию массы источника тока. Тогда общая сумма эксплуатационных затрат по электромобилям может быть определена с помощью следующей зависимости:

$$C = C_{\text{пост}} + C_{\text{пер}} L + z \frac{G_p L}{\rho - L}, \quad (4.34)$$

где z — переменные затраты второго рода в расчете на единицу массы источника тока, руб./кг (руб./т).

К переменным затратам второго рода целесообразно отнести: затраты на электрическую энергию для перемещения электромобилей; амортизационные отчисления источника тока; затраты на обслуживание и ремонт аккумуляторных батарей.

Для расчета переменных затрат второго рода могут быть применены следующие зависимости.

Амортизационные отчисления по аккумуляторной батарее

$$A = \frac{CN}{100} T_{\text{ц}} G_{\text{Б}}, \quad (4.35)$$

где C — удельная цена источника тока, руб./кг; $T_{\text{ц}}$ — количество циклов работы батареи аккумуляторов; N — норма амортизации; причем

$$N = \frac{K_{\text{Б}} - K_{\text{Б}}^0}{T_{\text{с}} K_{\text{Б}}^0} 100 = \frac{\delta}{T_{\text{с}}} 100,$$

где K_B — первоначальная стоимость (балансовая) аккумуляторной батареи, руб.; K_B^0 — остаточная стоимость аккумуляторной батареи, руб.; T_0 — срок службы батареи аккумуляторов, циклы; δ — коэффициент, учитывающий остаточную стоимость источника тока.

Затраты электрической энергии могут быть рассчитаны на основе зависимости

$$\mathcal{E} = \frac{C_{\text{э}} \gamma}{\eta_{\text{а. у}}} T_{\text{ц}} G_B, \quad (4.36)$$

где $C_{\text{э}}$ — цена 1 кВт.ч электрической энергии, руб./(кВт.ч); $\eta_{\text{а. у}}$ — КПД зарядного устройства; γ — коэффициент, учитывающий степень разряда источника тока.

Затраты на обслуживание и ремонт аккумуляторных батарей включают затраты на: проверку и регулировку уровня плотности электролита; определение и замену неисправного аккумулятора; заряд аккумуляторных батарей.

Анализ показывает, что данные затраты зависят в основном от энергоемкости и количества циклов работы источника тока.

В связи с этим целесообразно их удельную величину рассчитывать на 1 кВт.ч — цикл работы источника тока. Это позволит общую сумму затрат на обслуживание и ремонт аккумуляторных батарей определять с помощью зависимости

$$Z_0 = Z_{\text{у}} e T_{\text{ц}} G_B, \quad (4.37)$$

где $Z_{\text{у}}$ — удельные затраты на обслуживание батарей аккумуляторов в расчете на 1 кВт.ч — цикл работы, руб.

Согласно изложенному выше общая сумма переменных затрат второго рода может быть рассчитана по формуле

$$C_{\text{пер}}^{\text{II}} = A + \mathcal{E} + Z_0 = G_B T_{\text{ц}} \left(\frac{C\delta}{T_0} + \frac{C_{\text{э}} \gamma}{\eta_{\text{а. у}}} + Z_{\text{у}} e \right), \quad (4.38)$$

или

$$C_{\text{пер}}^{\text{II}} = z \frac{G_p L}{\rho - L},$$

где

$$z = T_{\text{ц}} \left(\frac{C\delta}{T_0} + \frac{e C_{\text{э}} \gamma}{\eta_{\text{а. у}}} + Z_{\text{у}} e \right). \quad (4.39)$$

Тогда себестоимость перевозок электромобилями в расчете на единицу транспортной продукции, выраженной в тоннокилометрах, может быть определена на основе зависимости

$$S = \frac{G_{\text{пост}} + C_{\text{пер}} L + z \frac{G_p L}{\rho - L}}{\sigma \gamma_0 \beta L}. \quad (4.40)$$

Полученная зависимость достигает экстремальных значений при следующих величинах запаса хода:

$$L_1 = \frac{\rho}{1 + \sqrt{\frac{G_p z}{C_{\text{пост}}}}}; \quad (4.41)$$

$$L_2 = \frac{\rho}{1 - \sqrt{\frac{G_p z}{C_{\text{пост}}}}}. \quad (4.42)$$

Дополнительно проведенный анализ показал, что в первом случае в выражении (4.41) имеет место минимум себестоимости перевозок. При этом масса аккумуляторной батареи будет равна

$$G_B = G_p \sqrt{\frac{C_{\text{пост}}}{G_p z}} = \sqrt{\frac{G_p C_{\text{пост}}}{z}}. \quad (4.43)$$

Важным конструктивным параметром является соотношение массы батареи и электромобиля, при котором себестоимость перевозок получается минимальной. В данном случае его можно определить по формуле

$$n = \frac{G_B}{G_0} = \frac{\sqrt{G_p C_{\text{пост}}}}{\sqrt{z(G_p + G_B)}}. \quad (4.44)$$

При расчетах следует учитывать, что масса аккумуляторной батареи не может увеличиваться бесконечно (из условий прочности конструкции транспортного средства) и при заданной грузоподъемности электромобиля не может превышать определенного значения G_B^r , при котором обеспечивается максимальное значение запаса хода

$$L^r = \frac{\rho G_B^r}{G_p + G_B^r}.$$

Дальнейшее увеличение массы батареи аккумуляторов на электромобиле и, следовательно, запаса хода возможно лишь за счет снижения грузоподъемности транспортного средства. В этом случае зависимость себестоимости перевозок от запаса хода электромобилей будет иметь вид

$$S = \frac{C_{\text{пост}} + C_{\text{пер}} L + \frac{z G_0}{\rho} L}{\gamma_s \beta \left[G_0 - \frac{G_0}{\rho} L \right] L}. \quad (4.45)$$

Это выражение имеет минимум при следующих значениях запаса хода электромобилей:

$$L_{\min} = k_s \left(\sqrt{\frac{G_0 \rho}{G_0 k_s} + 1} - 1 \right), \quad (4.46)$$

где

$$k_s = \frac{C_{\text{пост}}}{r_{\text{пер}}};$$
$$r_{\text{пер}} = C_{\text{пер}} + G_s z / p.$$

Или то же самое при массе аккумуляторной батареи

$$G_B = \frac{G_s C_{\text{пост}}}{r_{\text{пер}} \rho} \left(\sqrt{\frac{G_0 \rho}{G_s k_s} + 1} - 1 \right). \quad (4.47)$$

Используя полученные зависимости, в качестве примера определим оптимальные значения запаса хода и массы батареи электромобиля ВАЗ-21029 с железо-никелевой аккумуляторной батареей типа НЖТ-130. Основные технико-эксплуатационные показатели электромобиля были приведены на стр. 160. Удельная энергоёмкость батареи аккумуляторов равна 36 Вт.ч/кг, срок службы — 600 циклов (при работе в режиме электромобиля), стоимость — не более 105 руб./(кВт.ч.).

Проектная стоимость — оптовая цена электромобиля, устанавливаемая путем набора цен основных узлов и агрегатов, полученных исходя из действующих цен на аналогичные изделия, составила для электромобиля (без батареи аккумуляторов) 4312 руб. При этом стоимость узлов и деталей электропривода, а также систем электромобиля, не имеющих аналога, принята по результатам расчета затрат на производство 1000 комплектов в год.

Согласно предварительным расчетам постоянные расходы составят по электромобилю 5,49 руб. на автомобиле-день работы, переменные — 0,0294 руб./км и переменные расходы второго рода — $7,83 \cdot 10^{-2}$ руб./(кВт.ч-цикл). Затраты электрической энергии на перемещение электромобиля — 140 Вт.ч/(т.км).

Тогда

$$p = e/\omega = 36/0,14 = 257,1;$$

$$r_{\text{пер}} = C_{\text{пер}} + (G_s/p)z = 0,0294 + \frac{1,66}{257,1} 7,83 = 0,08 \text{ руб./км};$$

$$k_s = C_{\text{пост}}/r_{\text{пер}} = \frac{5,49}{0,08} = 68,6.$$

Пробег, при котором будет достигнут минимум себестоимости перевозок, рассчитываем по формуле (4.46)

$$L_{\text{min}} = 68,6 \left(\sqrt{\frac{0,86 \cdot 257,1}{1,66 \cdot 68,6} + 1} - 1 \right) = 49,1.$$

Требуемая масса аккумуляторной батареи в этом случае может быть определена с помощью зависимостей (4.32) или (4.47). Она составит 0,314 т.

Максимально возможный запас хода в километрах при полном использовании грузового пространства под аккумуляторную батарею будет

$$L = \frac{G_0 P}{G_a} = \frac{0,86 \cdot 257,1}{1,66} = 133,2.$$

На рис. 4.5 для сравнения приведены зависимости изменения себестоимости перевозок на автомобиле ВАЗ-21029 и автомобиле ИЖ-2715. Из графиков следует, что при небольших среднесуточных пробегах и соответствующих им величинах запаса хода себестоимость перевозок на электромобилях ниже, чем на автомобилях с ДВС. При пробегах, равных примерно 60 км, себестоимости перевозок на автомобилях и электромобилях равны. Использование антиоксидантных устройств на автомобилях с ДВС ведет к снижению загрязнения атмосферы отработавшими газами, но увеличивает цену транспортных средств и, следовательно, себестоимость перевозок. Это, в свою очередь, повышает область эффективного использования электромобилей еще примерно на 5,0 км. В данном случае речь идет об области эффективного использования электромобилей с точки зрения себестоимости перевозок. Вместе с тем известно, что себестоимость перевозок не является исчерпывающим показателем эффективности транспортных средств (в том числе и электромобилей), так как она отражает затраты на перевозку лишь на уровне отдельных автотранспортных предприятий.

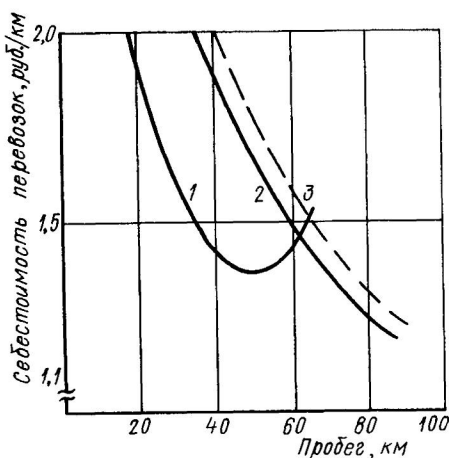


Рис. 4.5. Изменение себестоимости перевозок на автомобилях с ДВС и электромобилях в зависимости от величины среднесуточного пробега:

1 — электромобиль; 2 — автомобиль с ДВС; 3 — то же автомобиль с антиоксидантным устройством

4.4. ВЫБОР И ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ПРИВЕДЕННЫХ ЗАТРАТ

Общественные затраты живого, овеществленного труда и капитальных вложений отражают приведенные затраты, рассчитываемые по известной формуле

$$З = S + E_n K_v, \quad (4.48)$$

где $З$ — приведенные затраты на единицу продукции (работы), руб.; S — себестоимость продукции (работы), руб.; K_v — удельные капитальные вложения в производственные фонды, руб.;

$E_{\text{н}}$ — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений.

Любой производственный процесс считается наиболее эффективным в том случае, когда результат достигается при минимуме приведенных затрат. Это в полной мере относится и к автомобильному транспорту. В связи с этим рассмотрим, как влияют некоторые конструктивные параметры и запас хода электромобиля на величину приведенных затрат.

Выделим из суммы капитальных вложений в электромобиль капитальные затраты на аккумуляторную батарею и представим эксплуатационные затраты как сумму постоянных, переменных и затрат второго рода. Тогда аналитическое выражение для расчета удельных приведенных затрат на единицу транспортной продукции запишется в виде

$$Z = \frac{C_{\text{пер}} ADL + C_{\text{пост}} + \frac{G_0 z}{p} L + E_{\text{н}} \left[K_0 + \sum_{t=1}^{T^3} \frac{K_{\text{Б}}}{(1 + E_{\text{н. п}})^t} \right]}{\gamma c \beta \left(G_0 - \frac{G_0}{p} L \right) ADL}, \quad (4.49)$$

где K_0 и $K_{\text{Б}}$ — капитальные вложения в электромобиль (без аккумуляторной батареи) и батарею аккумуляторов, руб.; $E_{\text{н. п}}$ — нормативный коэффициент приведения; t — период приведения, лет; T^3 — срок службы электромобиля, лет; AD — автомобиле-дни работы электромобиля, дни.

Приведение капитальных вложений в аккумуляторную батарею к единому начальному моменту времени вызвано необходимостью неоднократной замены аккумуляторных батарей за время эксплуатации электромобиля в связи с меньшим их сроком службы.

Из выражения (4.39) следует, что рассмотрен случай, когда полная масса электромобиля является величиной постоянной, а увеличение запаса хода происходит за счет увеличения массы батареи аккумуляторов при снижении грузоподъемности.

В приведенном выражении все эксплуатационные расходы берутся в расчете на год, а произведение автомобиле-дней работы электромобиля на запас хода (суточный пробег) дает годовой пробег транспортного средства.

После ряда преобразований и, введя обозначения

$$z' = \left(z + C \sum_{t=1}^{T^3} \frac{E_{\text{н}}}{(1 + E_{\text{н. п}})^t} \right) \frac{G_0}{p},$$

$$R_{\text{пост}} = C_{\text{пост}} + E_{\text{н}} K_0,$$

$$R_{\text{пер}} = C_{\text{пер}} AD + z',$$

$$k_3 = R_{\text{пост}} / R'_{\text{пер}},$$

получим окончательное выражение для анализа влияния конструктивных параметров электромобилей на величину приведенных затрат, имеющее следующий вид:

$$Z = \frac{C_{\text{пер}}ADL + C_{\text{пост}} + z'L + E_{\text{н}}K_{\text{э}}}{\gamma_0\beta \left(G_0 - \frac{G_{\text{э}}}{\rho} L\right) ADL}, \quad (4.50)$$

или

$$Z = \frac{C_{\text{пер}} \frac{G_{\text{Б}}\epsilon}{\omega G_{\text{э}}} AD + C_{\text{пост}} + E_{\text{н}}K_{\text{э}} + G_{\text{Б}}z'}{\gamma_0\beta (G_0 - G_{\text{Б}}) \frac{G_{\text{Б}}\epsilon}{\omega G_{\text{э}}} AD}. \quad (4.51)$$

Полученные выражения позволяют оценивать влияние на приведенные затраты таких показателей, как полная масса электромобиля, грузоподъемность, масса аккумуляторной батареи, удельная энергоемкость источника тока, затраты энергии на перемещение электромобиля, запас хода и другие, а также выявлять критические точки, т. е. те значения конструктивных и эксплуатационных показателей, при которых имеет место минимум приведенных затрат.

Анализ выражений (4.50) и (4.51) на экстремум показал, что минимум приведенных затрат достигается при следующих значениях запаса хода и массы аккумуляторной батареи электромобиля:

$$L = \frac{eK_{\text{э}}}{\omega G_{\text{э}}} \left(\sqrt{1 + \frac{G_0}{k_{\text{э}}}} - 1 \right), \quad (4.52)$$

$$G_{\text{Б}} = k_{\text{э}} \left(\sqrt{1 + \frac{G_0}{k_{\text{э}}}} - 1 \right). \quad (4.53)$$

С помощью полученных зависимостей были определены для предыдущего примера оптимальный пробег и соответствующая ему масса аккумуляторной батареи, обеспечивающие минимум приведенных затрат на единицу транспортной продукции, выраженной в тоннокилометрах.

Согласно расчетам запас хода составляет 48,5 км, а масса аккумуляторной батареи — 0,313 т.

Ниже для сравнения приведены оптимальные значения массы аккумуляторной батареи и запаса хода с точки зрения различных критериев — производительности, себестоимости перевозок и приведенных затрат для электромобиля ВАЗ-21029.

Масса электромобиля (без батареи аккумуляторов), т	0,70
Грузоподъемность, т	0,43
Оптимальные значения массы аккумуляторной батареи и запаса хода по критериям:	
производительность	
масса аккумуляторной батареи, т	0,43
запас хода, км	70

себестоимость перевозок	
масса аккумуляторной батареи, т	0,314
запас хода, км	49,1
приведенные затраты	
масса аккумуляторной батареи, т	0,313
запас хода, км	48,5

Из приведенных выше данных следует, что оптимальные значения параметров массы и запаса хода электромобиля, рассчитанные по критериям минимума себестоимости перевозок и приведенных затрат, практически совпадают. Вместе с тем они значительно отличаются от таковых по критерию максимум производительности подвижного состава.

Таким образом, с помощью полученных выражений уже на стадии проектирования электромобилей в зависимости от поставленной цели можно выбрать такие параметры массы (в том числе тяговой аккумуляторной батареи) и соответствующий запас хода, которые обеспечат либо максимум производительности, либо минимум себестоимости перевозок или приведенных затрат.

Однако такие расчеты еще не говорят об экономической целесообразности использования электромобилей в народном хозяйстве. Очевидно, чтобы ответить на этот вопрос, необходимо перейти к показателям сравнительной экономической эффективности, что будет сделано дальше.

Глава 5. ОБЛАСТЬ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

5.1. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОБЛАСТИ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Оценка экономической эффективности — это необходимый и важный этап разработки электромобилей, так как только на основе такой оценки можно судить о перспективности создаваемых образцов, масштабах их возможного производства и области целесообразного использования. Вопрос оценки эффективности использования электромобилей является весьма сложным и до конца не решенным. Это обусловлено прежде всего тем, что в настоящее время отсутствует необходимый статистический материал по эксплуатационным затратам, практически нет данных о стоимости производства электромобилей больших серий, а приводимые в технической литературе и нередко в отчетах об испытаниях технико-эксплуатационные характеристики их опытных образцов носят ограниченный характер и часто завышены. Значительные трудности создает проблематичность теории и практики оценки экономической эффективности новой техники и капитальных вложений.

В связи с этим имеющиеся в настоящее время примеры оценки экономической эффективности электромобилей порой недостаточно методически обоснованы и часто носят условный характер.

Поэтому (прежде чем перейти к изложению методических основ оценки области эффективного использования электромобилей) целесообразно уточнить некоторые понятия и определения.

В дальнейшем будем понимать под областью эффективного использования электромобилей совокупность среднесуточных (годовых) пробегов (запасов хода), при которых показатели экономической эффективности электромобилей будут не ниже, чем у однотипных, принятых за базу сравнения, автомобилей с ДВС, а соответствующие технико-эксплуатационные показатели — эффективными параметрами.

Все виды перевозок, на которых могут быть использованы электромобили, имеющие такие параметры, определим как сферу экономически целесообразного использования электромобилей.

Среднесуточные пробеги (запас хода), при которых экономические показатели сравниваемых электромобилей и автомобилей с ДВС одинаковы, назовем границей области эффективного использования электрических автомобилей.

Расчеты по оценке эффективности применения электромобилей в народном хозяйстве будем проводить на основе общепринятой методики, а также в ряде случаев для сравнения будут использованы методические положения, предлагаемые авторами.

При исследовании эффективности использования электромобилей целесообразно выделить два основных типа источников тока.

Аккумуляторы — источники тока, в которых вещества, израсходованные в процессе протекания реакции, дающей электрическую энергию, регенерируют при пропускании тока в обратном направлении от постоянного источника электрической энергии. Таким образом, энергоемкость данного вида химических источников тока ограничена рабочим объемом аккумулятора.

Электрохимические генераторы энергии — системы, в которых активные материалы вводятся извне по мере их расходования, и, следовательно, их энергоемкость ограничена размерами топливного бака.

Деление химических источников тока на аккумуляторы и электрохимические генераторы в данном случае обусловлено принципиально различным подходом к способу увеличения их энергоемкости: в первом случае для этого необходимо увеличивать размеры и, следовательно, массу источника тока, а во втором — емкость топливных баков. Эти обстоятельства (как будет показано ниже) оказывают влияние на вид экономико-математических моделей.

При построении экономико-математических моделей определения области эффективного использования аккумуляторных электромобилей также могут быть рассмотрены два случая. Первый случай, когда запас хода электромобилей не ниже требуемого среднесуточного пробега, и второй — когда запас хода электромобилей меньше величины требуемого среднесуточного пробега и для его увеличения необходимо применять организационно-технические мероприятия, такие, как промежуточная подзарядка аккумуляторных батарей или их замена во время работы электромобилей на линии.

ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СРАВНЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМОБИЛЕЙ С ДВС И ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

При формировании экономико-математической модели сравнения эффективности автомобилей с ДВС и электромобилей эксплуатационные затраты следует подразделить на постоянные и переменные, а для электромобилей необходимо также выделить переменные затраты второго рода. Подробная классификация затрат была приведена в гл. 4.

Ранее было отмечено, что в группе приведенных затрат по электромобилю следует выделить затраты на батарею аккумулятора.

При расчетах экономической эффективности электромобилей следует учесть фактор времени путем приведения к одному моменту времени единовременных и (при необходимости) текущих затрат

по источнику тока. Это обусловлено тем, что срок службы аккумуляторных батарей в несколько раз ниже срока службы самого электромобиля и в процессе его эксплуатации следует вводить дополнительные затраты в источник тока.

Капитальные вложения в источник тока с учетом фактора времени могут быть рассчитаны с помощью зависимостей

$$Z_B = G_B \Pi_{\text{пр}} B, \quad (5.1)$$

где

$$B = \sum_{t=1}^{T^3} 1/(1 + E_{\text{н. п}})^t.$$

В приведенном выражении $\Pi_{\text{пр}}$ — цена источника тока в расчете на единицу массы аккумуляторной батареи.

При построении экономико-математических моделей целесообразно ввести следующие обозначения:

$$Z_a \frac{B_a}{B_a} \frac{P_a + E_{\text{н}}}{P_a + E_{\text{н}}} \mu + K'_a = K_a$$

— приведенные затраты с учетом срока службы и сопутствующие автомобилю капитальные вложения, руб.;

$$Z_3 \mu + K'_3 = K_3$$

— приведенные затраты и сопутствующие электромобилю капитальные вложения, руб.;

$$C_{\text{пост}}^a + E_{\text{н}} K_a = R_{\text{пост}}^a$$

— постоянная составляющая эксплуатационных и капитальных затрат на автомобиль, руб.;

$$C_{\text{пост}}^3 + E_{\text{н}} K_3 = R_{\text{пост}}^3$$

— то же для электромобиля, руб.;

$$R_{\text{пост}}^a - R_{\text{пост}}^3 = \Delta R$$

— разность постоянных составляющих, руб.;

$$G_p (z + B \Pi_{\text{пр}} \mu E_{\text{н}}) = z_0$$

— переменные затраты второго рода и приведенные затраты в источник тока, руб.;

$$(P_3 + E_{\text{н}})/E_{\text{н}} = \mu$$

— постоянный коэффициент;

$$A D_a C_{\text{пер}}^a - A D_3 C_{\text{пер}}^3 = \Delta C_{\text{пер}}$$

— разность переменных затрат в расчете на год на 1 км пробега транспортных средств, руб./км.

С учетом принятых обозначений и после ряда преобразований приведенное ранее выражение (4.1) примет вид

$$\mathcal{E} = \left(\Delta C_{\text{пер}} L + \Delta R - \frac{z_0 L}{p - L} \right) \frac{A_0}{P_0 + E_{\text{н}}}. \quad (5.2)$$

Не останавливаясь подробно на анализе полученного выражения, изложим методику расчета его отдельных составляющих.

МЕТОДИКА И РАСЧЕТ ПРИВЕДЕННЫХ ЗАТРАТ НА ПРОИЗВОДСТВО ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Приведенные затраты могут быть определены с помощью выражения (4.48) как сумма себестоимости производства транспортного средства и нормативной прибыли в виде произведения удельных капитальных вложений в производственные фонды на нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, равный 0,15.

Известно, что себестоимость производства транспортных средств зависит от конструктивных особенностей, технико-эксплуатационных характеристик, масштабов и сроков производства. Зависимости себестоимости производства автомобилей и их отдельных агрегатов от различных факторов подробно исследованы в работах М. И. Ипатова, Ж. А. Ненашевой и других ученых.

Согласно этим исследованиям для расчета себестоимости производства грузовых автомобилей предлагается выражение:

$$S_a = 308q^{1,11} N^{0,54} e_{\text{уд}} k_{\text{тар}}^{1,26} A_{\text{год}}^{-0,2}, \quad (5.3)$$

где $Ne_{\text{уд}}$ — удельная мощность (отношение максимальной мощности двигателя к полной массе автомобиля), кВт·ч/кг; q — грузоподъемность автомобиля, т; $k_{\text{тар}}$ — коэффициент тары (отношение собственной массы автомобиля в снаряженном состоянии к максимальной грузоподъемности); $A_{\text{год}}$ — годовой масштаб производства транспортных средств, тыс. шт./год.

Себестоимость производства электромобилей определяется себестоимостью производства шасси, кузова электромобиля и себестоимостью тягового электрооборудования, включая тяговый электродвигатель и системы его регулирования.

Учитывая, что электромобили, как правило, создаются на базе существующих автомобилей с ДВС и в их конструкции широко используются унифицированные узлы и агрегаты, их себестоимость может быть определена прямым счетом путем вычитания из себестоимости базового автомобиля тех составляющих, которые не входят в конструкцию электромобиля, и суммирования деталей и узлов, необходимых для функционирования электромобилей.

Согласно работе [14] такие расчеты можно выполнить с помощью выражения

$$S = \lambda \left[\sum_{i=1}^m (n_i S_{\text{арг } i}) + \sum_{i=1}^p (r_i C_{\text{арг } i}) \right],$$

где $S_{\text{агр.т}}$ — себестоимость агрегата, производимого на заводе, руб.; $C_{\text{агр.т}}$ — оптовая цена покупных агрегатов с учетом возможного изменения объема выпуска на заводе-изготовителе, руб.; m — номенклатура основных агрегатов собственного изготовления всех наименований; n — число одноименных агрегатов данной конструкции (собственного изготовления); p — номенклатура покупных агрегатов всех наименований; r — число одноименных покупных агрегатов данной конструкции; λ — коэффициент, учитывающий затраты на сборку транспортного средства и прочие неучтенные расходы.

Наиболее вероятно, что при производстве электромобилей основными покупными изделиями будут батареи аккумуляторов и электрооборудование электромобилей.

С учетом изложенного для расчета себестоимости производства электромобиля может быть использовано выражение

$$S_9 = [S_a - (S_{\text{дв}} + S_{\text{к.п}} + S_{\text{кард}} + C_{\text{рад}} + C_{\text{т.б}})\lambda_2 + C_{\text{эл}}]\lambda_3, \quad (5.4)$$

где S_9 — себестоимость создаваемого электромобиля (без аккумуляторной батареи), руб.; $S_{\text{дв}}$, $S_{\text{к.п}}$, $S_{\text{кард}}$ — соответственно себестоимость изготовления двигателя, коробки передач, карданного вала, руб.; $C_{\text{рад}}$ и $C_{\text{т.б}}$ — оптовые цены радиатора системы охлаждения и топливного бака, руб.; λ_2 — коэффициент, учитывающий неучтенные детали и узлы автомобиля, которые не входят в конструкцию электромобиля; $C_{\text{эл}}$ — стоимость производства тягового электрооборудования и электропривода; λ_3 — коэффициент, учитывающий затраты на сборку и себестоимость остальных, неучтенных элементов электромобиля.

Анализ конструктивно-стоимостных проработок отдельных вариантов тягового электрооборудования показал, что стоимость (оптовая цена) его производства может быть определена с помощью выражения

$$C_{\text{эл}} = 1000(1,802 + 0,08q - 0,000124A_{\text{год}})k_y, \quad (5.5)$$

где k_y — коэффициент, учитывающий степень возможного удешевления электрооборудования электромобиля; он изменяется от 1 до 0,65 при соответствующем снижении полезной транспортной работы электромобиля на 3—5 %.

В работе М. И. Ипатова [14] приведен перечень экономико-математических выражений, позволяющих рассчитать себестоимость производства отдельных агрегатов автомобилей в зависимости от конструктивных параметров, масштабов производства и других факторов.

Для расчета себестоимости карбюраторных ДВС, коробок передач и карданных валов могут быть использованы выражения:

$$S_{\text{дл}} = V_p \frac{1500}{\sqrt[3]{A_{\text{год}}}}, \quad (5.6)$$

$$S_{д2} = 30V_p/\sqrt[3]{A_{год}}, \quad (5.7)$$

$$S_{к.п} = 0,7M_{max}^{0,9}d_o^{0,89}A_{год}^{-0,3}, \quad (5.8)$$

$$S_{кард} = n_k(6,2 + 0,267G_k)A_{год}^{-0,2}, \quad (5.9)$$

где $S_{д1}$ и $S_{д2}$ — себестоимость производства соответственно рядного и V-образного ДВС, руб.; V_p — рабочий объем цилиндров двигателя, л; M_{max} — максимальный крутящий момент, Н·м; $A_{год}$ — годовой объем выпуска, тыс. шт.; d_o — диапазон передаточных чисел; G_k — масса карданного сочленения, кг; n_k — количество карданных сочленений в машине.

Для расчета стоимости радиатора и топливного бака можно использовать зависимости:

$$C_{рад} = (110,6 + 1,47G_{рад})\delta_c;$$

$$C_{т.б} = (24,2 + 0,19V_{т.б})\delta_c,$$

где $G_{рад}$ — масса радиатора, кг; $V_{т.б}$ — емкость топливного бака, л; δ_c — коэффициент, учитывающий снижение цены радиатора или топливного бака в зависимости от масштабов производства; ориентировочно можно принять, что $\delta_c = A_{год}^{-0,2}$.

Удельные капитальные вложения в производство автомобилей зависят от масштабов выпуска и могут быть рассчитаны по формуле

$$K_{в.а} = K_{уд}\delta_k, \quad (5.10)$$

где $K_{уд}$ — удельные капитальные вложения при выпуске двадцати пяти тысяч автомобилей в год, руб.; δ_k — коэффициент серийности; он определяется по формуле

$$\delta_k = 30/\sqrt[3]{A'_{год}}, \quad (5.11)$$

где $A'_{год}$ — среднегодовой выпуск автомобилей после окончания периода освоения за период нормативного срока окупаемости, а при отсутствии таких данных — выпуск продукции на второй год после окончания периода освоения производства.

Изменение удельных капитальных вложений при годовом производстве автомобилей 25 тыс. ед. в год в зависимости от грузоподъемности определяется по формуле

$$K_{уд} = 1000(6,2 + 0,246q). \quad (5.12)$$

Удельные капиталовложения в производство электромобилей (без аккумуляторной батареи и электрооборудования) могут быть ориентировочно определены по формуле

$$K_{в.э} = K_{в.а}\lambda_1, \quad (5.13)$$

где λ_1 — коэффициент, учитывающий соотношение капитальных вложений в производство автомобилей и электромобилей (без учета аккумуляторной батареи и электрооборудования).

Это соотношение может быть определено на основе данных о структуре удельных капитальных вложений на создание мощностей по производству грузовых автомобилей при использовании работы [21]. В этой работе отражен объем капитальных вложений в автомобильный завод, заводы двигателей и деталей двигателей, в электрооборудование и т. д. Могут быть использованы и другие методы, например экспертных оценок.

ЗАТРАТЫ В СФЕРЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Расчет эксплуатационных издержек автомобилей с ДВС. Выше было отмечено, что эксплуатационные затраты целесообразно подразделить на переменные и постоянные, т. е. на зависящие от пробега транспортных средств и не зависящие (или мало зависящие) от этого фактора.

Переменные расходы. Эти расходы включают в себя затраты на автомобильное топливо, смазочные и другие эксплуатационные материалы, техническое обслуживание и ремонт подвижного состава, затраты на восстановление и ремонт автомобильных шин, амортизацию транспортных средств.

Затраты на автомобильное топливо. Для грузовых автомобилей норма расхода жидкого топлива складывается из линейной нормы на пробег и нормы на транспортную работу — для бортовых автомобилей или нормы на каждую езду с грузом — для автомобилей-самосвалов. В связи с этим затраты на автомобильное топливо в расчете на 1 км пробега транспортного средства рассчитываются по формуле

$$C_T = [N_{км} + N_{т.км} q \beta \gamma] k C_{л} \cdot 10^{-2}, \quad (5.14)$$

где $N_{км}$ — линейная норма расхода топлива, л/100 км; $N_{т.км}$ — норма расхода топлива на транспортную работу, л/100 т.км; k — коэффициент, учитывающий дополнительный расход топлива в зимний период, на внутригаражные нужды и т. д.; $C_{л}$ — цена одного литра топлива, определяемая по прейскуранту № 04-02.

Затраты на смазочные и другие эксплуатационные материалы. Эти затраты устанавливаются на каждые 100 литров жидкого топлива. Общая сумма затрат на смазочные и другие эксплуатационные материалы может быть рассчитана по формуле

$$C_{см} = \sum_{i=1}^l R_i Q_i C_i, \quad (5.15)$$

где R_i — норма расхода i -го вида смазочных материалов; C_i — цена i -го вида смазочных материалов в расчете на единицу объема; l — количество видов смазочных и эксплуатационных материалов; Q_i — расход топлива на 100 км пробега, л

Затраты на техническое обслуживание и ремонт подвижного состава. Данные затраты в расчете на 1 км пробега могут быть определены с помощью выражения

$$C_{т.о} = H_{т.о} + H_{т.р}k_{к.р}/1000, \quad (5.16)$$

где $H_{т.о}$ — норма затрат на техническое обслуживание на 1000 км пробега, руб.; $H_{т.р}$ — норма затрат на текущий ремонт на 1000 км пробега, руб.; $k_{к.р}$ — коэффициент, снижающий норму расхода для автомобилей, не прошедших капитального ремонта.

Затраты на ремонт и восстановление автомобильных шин. Для расчета этого вида затрат можно использовать выражение

$$C_{ш} = H_{ш}n_a/1000, \quad (5.17)$$

где $H_{ш}$ — норма начислений на один комплект на 1000 км пробега, руб.; n_a — число колес автомобиля без учета запасного.

Амортизационные отчисления на капитальный ремонт и полное восстановление подвижного состава. Амортизационные отчисления на капитальный ремонт рассчитываются по формуле

$$C_{к.р} = C_a H_{к.р}/(100 \cdot 1000), \quad (5.18)$$

где C_a — балансовая стоимость автомобиля, руб.; $H_{к.р}$ — норма отчислений на капитальный ремонт автомобилей в процентах от стоимости на 1000 км пробега.

Для расчета амортизационных отчислений на восстановление грузовых автомобилей грузоподъемностью более 2 т используют выражение

$$C_v = C_a H_v/(100 \cdot 1000), \quad (5.19)$$

где H_v — норма отчислений на полное восстановление автомобилей в процентах от стоимости на 1000 км пробега.

Постоянные затраты. Эти затраты включают в себя расходы по амортизации подвижного состава на восстановление (для автомобилей грузоподъемностью менее 2 т), накладные расходы и, условно, заработную плату водителей.

Амортизационные отчисления на восстановление подвижного состава (для автомобилей грузоподъемностью менее 2 т). Для расчета указанного вида расходов используют выражение

$$C_v = C_a H_v/100, \quad (5.20)$$

где H_v — норма отчислений на восстановление подвижного состава в процентах от балансовой стоимости автомобиля в расчете на год.

Накладные расходы. Их величину обычно определяют по сметам затрат или нормативам накладных расходов,

рассчитываемых обычно на один автомобиль в год или на единицу площади, занимаемой автомобилем.

Заработная плата водителей автомобилей с начислениями на социальное страхование. Заработную плату водителей, работающих из почасового расчета, можно условно отнести к постоянным затратам и определять, исходя из часовой тарифной ставки водителя третьего класса и времени, отработанного на линии, учтя коэффициентом различного рода доплаты и премии, а также дополнительную заработную плату

$$ЗП = (АЧ + ПЗ) С_{\text{час}} k_{\text{п}}, \quad (5.21)$$

где $АЧ$ — часы работы водителя на линии, ч; $ПЗ$ — подготовительно-заключительное время, составляющее 0,3 ч на день работы водителя; $С_{\text{час}}$ — часовая тарифная ставка водителя третьего класса, коп.; $k_{\text{п}}$ — коэффициент, учитывающий премии, доплаты и дополнительную заработную плату.

Отчисления на социальное страхование составляют 5,3 % от общей суммы заработной платы.

Расходы на эксплуатацию электромобилей. В расходах по эксплуатации электромобилей можно также выделить постоянные, переменные затраты и (как было отмечено в гл. 4) переменные затраты второго рода, т. е. пропорциональные массе аккумуляторной батареи.

Переменные затраты. В данную группу затрат входят расходы на восстановление и ремонт автомобильных шин, на смазочные и другие эксплуатационные материалы, техническое обслуживание (ТО) и технический ремонт (ТР) электромобилей (без учета аккумуляторной батареи) и на амортизацию подвижного состава.

Затраты на смазочные и другие эксплуатационные материалы. По приводимым в технической литературе многочисленным оценкам затраты на смазочные и другие эксплуатационные материалы (без учета таковых для аккумуляторной батареи) для электромобилей в два — четыре раза ниже, чем для автомобилей данной грузоподъемности. Их величина может быть рассчитана по существующим нормативным данным о затратах эксплуатационных материалов для автомобилей с ДВС, равной с ними грузоподъемностью, с учетом отсутствия затрат на двигательное масло и частично (до 50 %) затрат на трансмиссионное масло.

Затраты на ремонт и восстановление автомобильных шин. Для электромобилей (как и для автомобилей с ДВС) затраты на ремонт и восстановление шин зависят от цены комплекта шин, количества колес и нормы отчислений на один комплект на 1000 км пробега и, следовательно, могут быть рассчитаны с помощью выражений, аналогичных для автомобилей с ДВС.

Норма отчислений на один комплект шин зависит от их конструкции, условий эксплуатации, нагрузки и других факторов. Существует мнение, что более высокая плавность хода электромобилей позволит увеличить срок службы шин и тем самым снизить расходы на ремонт и их восстановление на 10—15 %. Лишь широкая опытная эксплуатация электромобилей позволит уточнить эту величину.

Затраты на ТО и ТР электромобилей. По многочисленным оценкам специалистов затраты на ТО и ТР электромобилей (без учета аккумуляторной батареи) могут быть в два-три раза ниже, чем для автомобилей той же грузоподъемности при прочих равных условиях.

Рассматриваемые затраты включают в себя расходы на запасные части, ремонтные материалы и заработную плату с начислениями на социальное страхование ремонтных рабочих, занятых на ТО и ТР механической части электромобиля (шасси и кузова), а также тягового электрооборудования.

Для оценки затрат на ТО и ТР электромобилей можно воспользоваться рекомендациями О. А. Ставрова [38], согласно которым для расчета затрат на ТО и ТР тягового электрооборудования следует использовать нормы затрат и трудоемкости, применяемые для аналогичных автомобильных и трамвайных агрегатов, а затраты на ТО и ТР механической части (шасси и кузова) рассчитывать с помощью следующих уравнений:

для грузовых электромобилей

$$Z_{\text{ТО. П}} = 0,001 (3,5 + 3,5 \cdot 10^{-3} G_{\text{ш}}),$$

для легковых электромобилей

$$Z_{\text{ТО. П}} = 0,001 (4,0 + 1,2 \cdot 10^{-3} G_{\text{ш}}),$$

для электробусов

$$Z_{\text{ТО. П}} = 0,001 (7,1 + 1,6 \cdot 10^{-3} G_{\text{ш}}).$$

Эти уравнения получены для электромобилей, имеющих оригинальную конструкцию.

Для конвертированных электромобилей эти затраты могут быть определены по существующим нормативам за вычетом затрат по узлам и агрегатам, отсутствующим у электромобилей.

Амортизационные отчисления на восстановление и капитальный ремонт подвижного состава. Из публикаций известно, что срок службы электромобилей в 1,5—2 раза выше, чем однотипных автомобилей и составляет примерно 15—20 лет. Это физический срок службы. Моральный же срок службы вряд ли будет превышать 10 лет. Это найдет отражение в нормах амортизационных отчислений. Математические выражения для расчета амортизационных отчислений для электромобилей, очевидно, будут такими же, как и для автомобилей.

Учитывая, что у электромобилей в механической части отсутствуют такие быстрознашивающиеся агрегаты, как двигатель внутреннего сгорания, сцепление и коробка перемены передач, система охлаждения, вероятнее всего капитальный ремонт электромобилей не потребуется, а если же будет в нем необходимость, то затраты на него будут ниже в 1,5—2 раза, чем для однотипных автомобилей.

Постоянные затраты. Выше было отмечено, что к ним следует отнести амортизационные отчисления на восстановление (реновацию) подвижного состава, накладные расходы и, условно, заработную плату водителей с начислениями на социальное страхование.

Согласно «Методике оценки экономической эффективности новой техники» при расчете эксплуатационных издержек по базовому и новому вариантам техники амортизационные отчисления на реновацию не учитываются.

Известно, что накладные расходы автотранспортного предприятия включают в себя расходы на содержание управления, общепроизводственные расходы, сборы и отчисления.

Для парка электромобилей, естественно ожидать различия в затратах по сравнению с парком автомобилей лишь во второй группе расходов, где нашли отражение затраты на содержание и эксплуатацию оборудования для ремонта и обслуживания транспортных средств.

В настоящее время нет основания полагать, что эти затраты для парка электромобилей будут выше, чем для автомобилей.

Величина накладных расходов для парка электромобилей ориентировочно может быть получена суммированием накладных расходов однотипного парка автомобилей с ДВС с разницей амортизационных отчислений по оборудованию для указанных парков транспортных средств.

Разница амортизационных отчислений по оборудованию для однотипных парков автомобилей и электромобилей может быть определена на основе анализа структуры оборудования электро- и автопарков.

Такой анализ позволяет выявить также величину сопутствующих капитальных вложений для автомобилей и электромобилей.

Заработную плату водителей электромобилей следует рассчитывать на основе существующей системы часовых тарифных ставок водителей автомобилей и используемой для этих целей методики. Если производительность электромобилей будет не ниже, чем у принятых за базу сравнения автомобилей, то заработная плата водителей рассматриваемых транспортных средств будет одинаковой.

Переменные затраты второго рода. В данную группу расходов входят амортизационные отчисления по батареям аккумуляторов, затраты на электрическую энергию для перемещения электромобилей и техническое обслуживание и ремонт источника тока.

Величина этих затрат может быть определена по формуле (4.28). Для вычисления расчетной массы электромобиля может быть использована зависимость

$$G_p = G_{\text{ш}} + q\gamma_0. \quad (5.22)$$

Статический коэффициент использования грузоподъемности принимается в соответствии с существующей классификацией перевозимых грузов.

Для расчета массы электромобиля без аккумуляторной батареи ($G_{\text{ш}}$) на основе статистических данных получена зависимость

$$G_{\text{ш}} = 0,88 + 0,51q. \quad (5.23)$$

Целесообразно подчеркнуть, что так называемые переменные затраты второго рода объединяют затраты, пропорциональные массе источника тока: они выделены в данном случае только для целей анализа эффективности электромобилей, при котором условно принято, что рост запаса хода будет происходить за счет увеличения массы источника тока.

СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ И МАСШТАБЫ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Масштабы производства и использования электромобилей определяются потребностью в перевозках народнохозяйственных грузов и возможностью использования для этих целей электромобилей. Возможность их применения во многом зависит от конструктивных параметров, требуемого среднесуточного пробега и запаса хода электромобилей.

Учитывая, что современные электромобили обладают небольшим запасом хода, сферу эффективного использования электромобилей необходимо искать на тех перевозках, где не требуется больших среднесуточных пробегов. К таким перевозкам следует отнести: почтовые перевозки (сбор и доставку почты крупным государственным учреждениям); обслуживание предприятий торговли — доставка с центральных баз в торговые точки и пункты общественного питания продовольственных товаров, полуфабрикатов, скоропортящихся продуктов и т. д.; обслуживание коммунального хозяйства, предприятий бытового обслуживания и другие перевозки.

Авторами были изучены и обобщены перевозки в Ленинграде, на которых автомобили малой и средней грузоподъемности имеют небольшие среднесуточные пробеги. По полученным данным небольшими среднесуточными пробегами обладают автомобили ведомственной подчиненности, а также автомобили общего пользования, работающие на почасовых перевозках. Так, среднесуточный пробег ведомственного автотранспорта в Ленинграде в момент обследования несколько превышал 120 км. В рассматриваемый момент в Ленинграде насчитывалось около 60 % автомо-

Структура парка грузовых автомобилей небольшой грузоподъемности

Тип кузова	Грузоподъемность, т	Доля, %	
		всех автомобилей	в том числе ведомственных
Бортовые	0,8—1,0	10,0	13,2
	1,0—2,5	25,4	35,9
	3,5—4,0	11,3	15,2
	4,5—5,0	25,4	28,1
Прочие	0,8—5,0	27,9	7,6
Всего		100,0	100,0

билей грузоподъемностью 0,8—5,0 т, из них примерно 50 % — ведомственной подчиненности; пикапов и фургонов на шасси легковых автомобилей — около 4,6 тыс. ед., причем более 30 % из них подчинено Министерству автомобильного транспорта РСФСР.

В табл. 5.1 приведены данные распределения грузовых автомобилей по Ленинграду согласно грузоподъемности.

Среди предприятий общего пользования в момент обследования наибольшую долю автомобилей, работающих на почасовых перевозках, имели автотранспортные предприятия (АТП) территориального объединения Ленторгбыттранс. Около 60 % всех автомобилей территориального объединения работают на почасовом графике. Структура парка автомобилей этого объединения, выраженная в долях процентов, согласно базовым моделям приведена ниже (грузоподъемность автомобилей до 2,5 т).

«Авиа»	1,9
«Ныса»	6,6
УАЗ	6,2
ЖУК	7,5
ЕрАЗ	8,0
«Волга»	1,8
«Москвич»	3,8
ГАЗ-51	10,5
ГАЗ-52	48,9
ГАЗ-52-07 (газобаллонный)	4,8
Всего	100,0

Чтобы изучить распределения автомобилей, работающих из почасового расчета, согласно их среднесуточному пробегу, была проанализирована работа трех наиболее представительных предприятий территориального объединения. Данные о среднесуточных пробегах собирались из путевых листов автомобилей, работа-

Распределение грузовых автомобилей в процентах, работающих с оплатой по почасовым тарифам, согласно их среднесуточным пробегам

Грузоподъемность, т	Среднесуточный пробег, км						
	До 40	40—60	60—80	80—100	100—120	120—140	Более 140
1,0	7,7	15,3	23,2	29,2	16,3	6,3	2,0
1,0—2,0	10,4	25,7	23,8	24,5	10,4	3,8	1,4
2,0—2,5	21,0	30,8	15,9	22,6	5,6	3,5	0,4

ющих на почасовых перевозках. Все автомобили были объединены согласно их грузоподъемности в три группы — до 1,0 т, 1,0—2,0 т, 2,0—2,5 т. Результаты обследования приведены в табл. 5.2.

На основании полученных данных построены графики распределения автомобилей согласно их среднесуточным пробегам (рис. 5.1).

Из табл. 5.2 и графиков на рис. 5.1 следует, что от 4 до 8 % грузовых автомобилей территориального объединения Ленторгбыттранс имеют среднесуточный пробег более 120 км, около 25 % — более 100 км.

Если учесть, что современные аккумуляторные электромобили имеют запас хода 80—100 км, то согласно полученным данным такие электромобили могли бы быть использованы на большинстве перевозок вместо аналогичных автомобилей в территориальном объединении Ленторгбыттранс, так как до 80 км имеют среднесуточный пробег примерно 60 % автомобилей грузоподъемностью до 1,0 т, 72 % — от 1,0 до 2,0 т и более 80 % — автомобили грузоподъемностью 2,2—2,5 т.

Дальнейшие обследования, выполненные в том же территориальном объединении, показали, что наименьшими среднесуточными пробегами обладают автомобили, перевозящие грузы продовольственной торговли. Несколько больше среднесуточные пробеги (из рис. 5.2) у автомобилей, перевозящих грузы промышленной торговли.

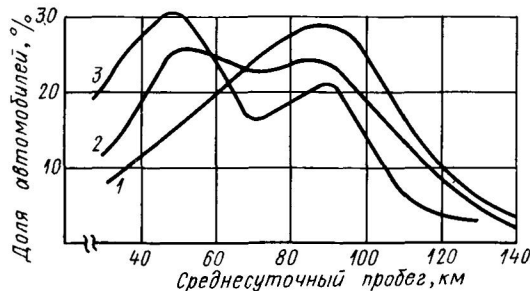
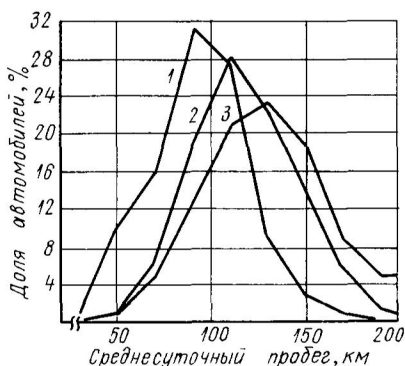


Рис. 5.1. Распределение автомобилей согласно среднесуточного пробега в территориальном объединении Ленторгбыттранс при их грузоподъемности:
1 — до 1 т; 2 — 1,0—2,0 т; 3 — 2,0—2,5 т

Рис. 5.2. Распределение автомобилей территориального объединения Ленторгбыттранс по видам перевозок:

1 — грузы продовольственной торговли; 2 — грузы промышленной торговли; 3 — прочие грузы



Более масштабные исследования, проведенные Институтом комплексных транспортных проблем (ИКТП) при Госплане СССР [34], в целом подтверждают эти выводы. В частности, на рис. 5.3 показано изменение возможной доли электромобилей в автопарке страны в зависимости от требуемого среднесуточного пробега.

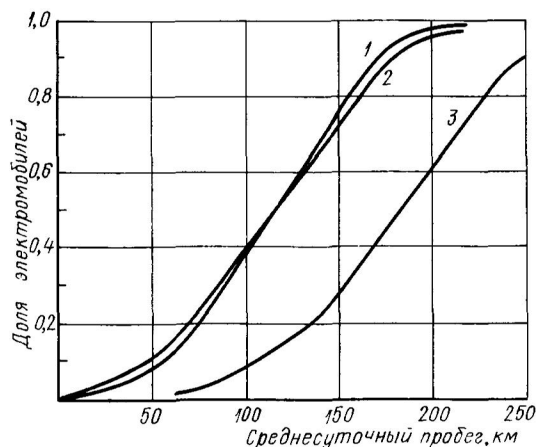
Из рис. 5.3 следует, что доля возможного производства и использования электромобилей в парке страны может быть описана логистической кривой, или кривой Б. Гомперца. В частности, для грузовых электромобилей малой и средней грузоподъемности их доля в автопарке страны может быть выражена зависимостью

$$d = e^{-30,26e^{-0,037L}}, \quad (5.24)$$

где e — основание натурального логарифма; L — возможный запас хода, км.

Тогда масштабы возможного использования таких электромобилей могут быть определены с помощью выражения

$$A = A_a d, \quad (5.25)$$



где A_a — требуемое количество автомобилей, используемых на перевозках, где могут быть применены проектируемые электромобили, ед.

Рис. 5.3. Изменение возможной доли электромобилей в парке автотранспортных средств в зависимости от запаса хода при грузоподъемности:

1 — малой; 2 — средней; 3 — большой

Согласно выражению (4.1) экономическая эффективность новой техники в значительной степени зависит от ее производительности.

Проведенный в гл. 4 анализ показал, что на величину производительности транспортных средств влияют многие факторы как технического, так и организационного характера.

При расчетах производительности автомобилей и электромобилей могут быть использованы выражения, приведенные в гл. 4.

*РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА
ОТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ*

Согласно выражению (5.2) на величину экономического эффекта от производства и использования электромобилей влияет их запас хода (среднесуточный пробег).

Учитывая, что электромобили могут эксплуатироваться в широком диапазоне среднесуточных пробегов, необходимо рассчитать средний годовой экономический эффект.

Предположим, что электромобили эксплуатируются в диапазоне пробегов от L_1 до L_2 . Тогда экономический эффект в расчете на один электромобиль в год в среднем составит

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{\int_{L_1}^{L_2} \left(\Delta C_{\text{пер}} L + \Delta R - \frac{z_0 L}{\rho - L} \right) dL}{L_2 - L_1}. \quad (5.26)$$

Если предположить, что $L_1 = 0$, то величина экономического эффекта будет

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = (\Delta R + z_0) + \frac{\Delta C_{\text{пер}}}{2} L_2 + \frac{z_0 \rho}{L_2} \ln \left(1 - \frac{L_2}{\rho} \right).$$

*ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ
ПО ПРЕДЛАГАЕМОЙ МЕТОДИКЕ*

Расчетная формула (4.10) предлагаемой методики оценки экономической эффективности новой техники, приведенная в гл. 4, может быть преобразована к виду

$$\mathcal{E} = \left[\left(\frac{Z_1}{T_1} + H_1 + OC_1 \right) \frac{B_2}{B_1} - \left(\frac{Z_2}{T_2} + H_2 + OC_2 \right) \right] \sum_{\tau=1}^T A_{2\tau}, \quad (5.27)$$

где $A_{2\tau}$ — потребность в электромобилях в τ -м году; T — расчетный срок службы новой техники, годы.

Причем

$$A_{2\tau} = Q_{\tau} / B_2,$$

где Q_{τ} — потребность в перевозках в τ -м году.

Нормы запаса материальных ресурсов

№ п/п	Наименование статьи	Норма запаса, в днях
1	Топливо для автомобилей	9,6
2	Смазочные и обтирочные материалы	30,0
3	Автомобильные шины на складе	40,0
4	Запасные части	80,0
5	Ремонтные материалы	45,0
6	Фонд оборотных агрегатов *	—
7	Малоценный и быстрознашивающийся инвентарь	280,0
8	Спецодежда	185,0

* Норматив по фонду оборотных агрегатов равен 3—4 % от стоимости оборотных агрегатов.

Учитывая сложности определения цены новой техники на стадии проектирования, стоимостную оценку старого и нового средства труда при расчетах эффективности (как и в действующей методике) целесообразно осуществлять по приведенным затратам — Z_1 и Z_2 .

В гл. 4 было показано, что издержки I_1 и I_2 включают в себя материальные затраты, заработную плату водителей и прибавочный продукт, пропорциональный заработной плате.

Необходимые для бесперебойной работы АТП запасы нормируемых оборотных средств могут быть определены по видам материальных ценностей произведением однодневного расхода и нормы запаса в днях.

Для нахождения однодневного расхода материальных ценностей затраты на планируемый период по данному виду материалов делят на длительность планируемого периода.

Средние величины норм запаса отдельных видов материальных ресурсов приведены в табл. 5.3.

При расчете запасов материальных ценностей для парка электромобилей следует учитывать изменения в структуре запасных частей, агрегатов, смазочных материалов; отсутствие запасов автомобильного топлива, а также наличие фонда сменных аккумуляторных батарей на случай выхода из строя работающих. Их величину рекомендуется принимать на уровне 10 % от стоимости устанавливаемых на электромобилях.

Учитывая, что основные элементы нормируемых оборотных средств (за исключением аккумуляторных батарей) становятся при использовании переменными затратами, их величину можно рассчитывать на 1 км пробега:

$$OC_i = \frac{Z_i}{D_k} DZ_i,$$

где OC_i — норматив оборотных средств по i -му элементу запасов в расчете на 1 км пробега транспортных средств, руб./км; Z_i — затраты i -го вида материальных ресурсов в планируемом году на 1 км пробега транспортных средств, руб./км; DZ_i — норма запаса по i -му элементу нормируемых оборотных средств, дни; D_k — количество календарных дней в году, дни.

По аккумуляторным батареям норматив оборотных средств может быть рассчитан в процентах от стоимости устанавливаемых на электромобилях источников тока и включен в группу затрат второго рода.

При расчете и анализе экономической эффективности транспортных средств целесообразно (как и в предыдущем случае) транспортные издержки подразделить на постоянные $C_{\text{пост1}}$ и $C_{\text{пост2}}$, и переменные $C_{\text{пер1}}$ и $C_{\text{пер2}}$.

По электромобилю необходимо обособить затраты, пропорциональные массе аккумуляторной батареи — z_0 .

Введем обозначения:

$$R_{\text{пост1}} = \left(\frac{Z_1}{T_1} + C_{\text{пост1}} \right) \frac{P_2}{P_1}$$

— постоянная составляющая по автомобилю, руб.;

$$R_{\text{пост2}} = (Z_2/T_2 + C_{\text{пост2}})$$

— постоянная составляющая по электромобилю, руб.;

$$\Delta R = R_{\text{пост1}} - R_{\text{пост2}}$$

— разность постоянных составляющих, руб.;

$$R_{\text{пер1}} = (C_{\text{пер1}} + OC_1) \frac{P_2}{P_1} AD_1$$

— переменная составляющая по автомобилю, руб./км;

$$R_{\text{пер2}} = (C_{\text{пер2}} + OC_2) AD_2$$

— переменная составляющая по электромобилю, руб./км;

$$\Delta C_{\text{пер}} = R_{\text{пер1}} - R_{\text{пер2}}$$

— разность переменных составляющих, руб./км;

$$z_0 = G_p \left(z + \frac{BC}{T} + \frac{Цр}{100} \right)$$

— затраты, пропорциональные массе источника тока, руб./т.

Кроме используемых ранее обозначений в приведенных выражениях введены следующие:

P_1, Z_1, T_1 — производительность, приведенные затраты и срок службы автомобиля;

P_2, Z_2, T_2 — то же по электромобилю;

OC_1 и OC_2 — нормативы оборотных средств по автомобилю и электромобилю, руб./км;

AD_1 и AD_2 — автомобиле-дни работы сравниваемых транспортных средств;

ρ — норматив запаса аккумуляторных батарей, %.

С учетом обозначений (после несложных преобразований), выражение (5.27) примет вид

$$\mathcal{E} = \left[\Delta R_{\text{пост}} + \Delta C_{\text{пер}} L - \frac{z_0 L}{\rho - L} \right] \sum_{\tau=1}^T A_{2\tau}. \quad (5.28)$$

Таким образом, полученное на базе предлагаемой методики выражение (5.28) для расчета экономической эффективности электромобилей практически мало отличается от выражения для действующей в настоящее время методики. При этом основные отличия состоят в исчислении затрат по сопоставляемым вариантам.

5.2. АНАЛИЗ ОБЛАСТИ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АККУМУЛЯТОРНЫХ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Для анализа области эффективного использования электромобилей может быть использовано выражение (5.2), представляющее собой разность совокупных затрат по сравниваемым вариантам. Очевидно, что если затраты на производство и эксплуатацию электромобилей будут (при прочих равных условиях) ниже, чем у автомобилей, то с экономической точки зрения электромобили эффективнее автомобилей.

Математически это условие может быть записано в следующем виде:

$$\mathcal{E} = \left[\Delta C_{\text{пер}} L + \Delta R - \frac{z_0 L}{\rho - L} \right] \frac{A_2}{P_2 + E_H} > 0. \quad (5.29)$$

Учитывая, что выражение, стоящее за скобками формулы (5.29), всегда больше нуля, целесообразно исследовать выражение, находящееся в квадратных скобках рассматриваемого равенства.

На рис. 5.4 и 5.5 представлены графики изменения функции

$$y = \Delta C_{\text{пер}} L + \Delta R - \frac{z_0 L}{\rho - L} \quad (5.30)$$

и отдельных ее составляющих.

Равенство нулю выражения (5.2) означает, что сравниваемые транспортные средства экономически равноценны. Нетрудно убедиться, что пробеги, при которых выполняется это условие, будут равны

$$L_{1,2} = \frac{-(z_0 + \Delta R - \Delta C_{\text{пер}} \rho) \pm \sqrt{(z_0 + \Delta R - \Delta C_{\text{пер}} \rho)^2 + 4 \Delta C_{\text{пер}} \Delta R \rho}}{2 \Delta C_{\text{пер}}}. \quad (5.31)$$

Пробеги L_1 и L_2 ограничивают область эффективного использования электромобилей.

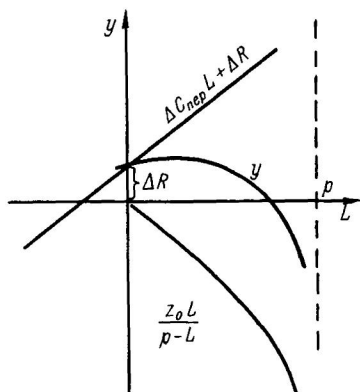


Рис. 5.4. Изменение эффекта от производства и использования автомобилей в зависимости от запаса хода при положительной разности переменных затрат

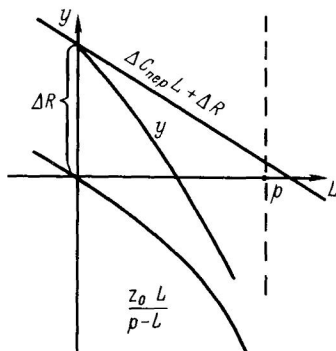


Рис. 5.5. Изменение эффекта от производства и использования автомобилей в зависимости от запаса хода при отрицательной разности переменных затрат

Анализ выражения (5.30) показывает, что возможны следующие варианты:

1) разности постоянных составляющих ΔR и переменных затрат $\Delta C_{\text{пер}}$ положительны; тогда автомобили экономически целесообразно использовать при пробегах

$$L_2 > L > L_1; L \geq 0;$$

2) разность постоянных затрат больше, а переменных — меньше нуля; в этом случае область эффективного использования автомобилей при пробегах

$$L < L_2; L \geq 0;$$

3) разность переменных затрат больше, а постоянных составляющих меньше нуля; тогда область эффективного использования автомобилей описывается неравенством

$$L_2 > L > L_1;$$

4) разности переменных затрат и постоянных составляющих отрицательны; в этом случае автомобили не эффективны.

Если обобщить рассмотренные варианты, то оказывается, что область эффективного использования автомобилей ограничена следующим неравенством:

$$L_2 \geq L \geq L_1; L \geq 0.$$

Анализ выражения (5.2) на экстремум показал, что оптимальный запас хода автомобилей, т. е. такой, при котором экономический эффект от производства и использования автомобилей

будет наибольшим, достигается, когда разность переменных затрат автомобиля и электромобиля положительна, а пробег

$$L = p - \sqrt{\frac{pz_0}{\Delta C_{\text{пер}}}}. \quad (5.32)$$

Если разность переменных затрат отрицательна, то экстремальных значений выражение (5.2) достигает при отрицательных значениях запаса хода. Наибольший эффект от производства и эксплуатации электромобилей в этом случае получается при небольших среднесуточных пробегах и условии, что разность постоянных составляющих положительна.

Из выражения (5.29) следует, что область эффективного использования электромобилей зависит от соотношения удельной энергоемкости источника тока и затрат энергии на перемещение электромобиля. Это хорошо иллюстрируется на рис. 5.6.

На рис. 5.7 и 5.8 показано влияние на область эффективного использования электромобилей таких величин, как разность переменных затрат и разность постоянных составляющих сравниваемых транспортных средств. Их увеличение, как это следует из рисунков, ведет к увеличению области эффективного использования электромобилей и росту экономического эффекта от их производства и эксплуатации. Этому способствует снижение величины переменных расходов второго рода.

Объем производства электромобилей A_e влияет не только на величину суммарного экономического эффекта, но и на область эффективного использования электромобилей. Это обусловлено тем, что увеличение объема производства электромобилей ведет к снижению приведенных затрат на единицу выпускаемой продукции. Снижение же приведенных затрат на производство электромобилей, по сравнению с этим показателем для автомобилей, ведет к увеличению разности постоянных составляющих в выражении

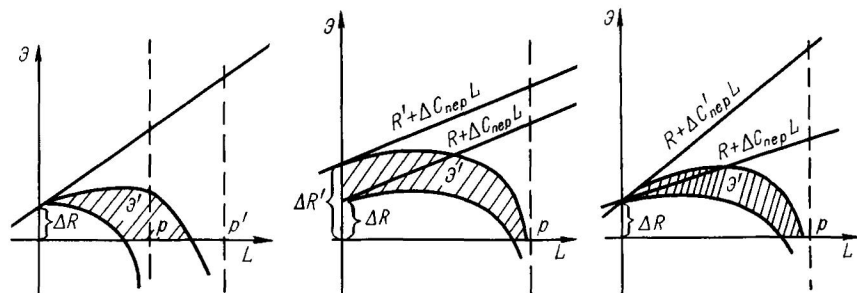


Рис. 5.6. Влияние на эффективность электромобилей соотношения энергоемкости аккумуляторных батарей и затрат на их перемещение

Рис. 5.7. Влияние постоянной составляющей на эффективность электромобилей

Рис. 5.8. Влияние разности переменных затрат на эффективность электромобилей

(5.2), что способствует (при прочих равных условиях) росту области эффективного использования электромобилей.

При оценке области эффективного использования электромобилей следует учитывать возможность подзарядки и замены аккумуляторных батарей электромобилей на линии во время работы и другие организационно-технические мероприятия по увеличению запаса хода.

При подзарядке аккумуляторных батарей электромобилей во время работы на линии энергоемкость ее увеличивается на величину

$$Qt_{п.з}\eta_B,$$

где $t_{п.з}$ — время промежуточной подзарядки аккумуляторов электромобиля, ч; η_B — коэффициент, учитывающий величину восстановления энергии источника тока в единицу ускоренной подзарядки.

Суммарная энергоемкость батареи аккумуляторов в расчете на рабочую смену составит

$$Q = G_B e (t_{п.з}\eta_B + 1).$$

Для варианта замены аккумуляторных батарей во время работы электромобилей на линии можно записать

$$Q = G_B e n_з,$$

где $n_з$ — количество замен аккумуляторных батарей электромобиля во время рабочей смены.

Для случая ускоренной подзарядки аккумуляторных батарей зависимость массы источника тока от запаса хода имеет вид

$$G_B = \frac{G_p L}{\rho (t_{п.з}\eta_B + 1) - L}.$$

То же выражение для варианта замены аккумуляторов на линии можно записать

$$G_B = \frac{G_p L}{\rho n - L}.$$

С учетом изложенного выше экономико-математические модели эффективности использования электромобилей примут вид:

$$\left[\Delta C_{пер} L + \Delta R - \frac{z_0 L}{\rho (t_{п.з}\eta_B + 1) - L} \right] \frac{A_з}{P_з + E_H} > 0; \quad (5.33)$$

$$\left[\Delta C_{пер} L + \Delta R - \frac{z_0 L}{\rho n - L} \right] \frac{A_з}{P_з + E_H} > 0. \quad (5.34)$$

Первое выражение используется для случая ускоренной подзарядки аккумуляторных батарей, второе — при замене их на линии.

Граница области эффективного использования электромобилей с учетом изменений, произошедших в экономико-математических моделях, может быть рассчитана по формулам:

при ускоренной подзарядке

$$L_{1,2} = \frac{- [z_0 + \Delta R - \Delta C_{\text{пер}} (t_{\text{п.з}} \eta_{\text{в}} + 1)] \pm \sqrt{[z_0 + \Delta R - \Delta C_{\text{пер}} (\eta_{\text{в}} t_{\text{п.з}} + 1)]^2 + 4 \Delta C_{\text{пер}} \Delta R (t_{\text{п.з}} \eta_{\text{в}} + 1)}}{2 \Delta C_{\text{пер}}}, \quad (5.35)$$

при замене источника тока на линии

$$L_{1,2} = \frac{-(z'_0 + \Delta R - \Delta C_{\text{пер}} p n_3) \pm \sqrt{(z'_0 + \Delta R - \Delta C_{\text{пер}} p n_3)^2 + 4 p n_3 \Delta R \Delta C_{\text{пер}}}}{2 \Delta C_{\text{пер}}}. \quad (5.36)$$

При расчетах области эффективного использования электромобилей следует учитывать, что в случае промежуточной под-

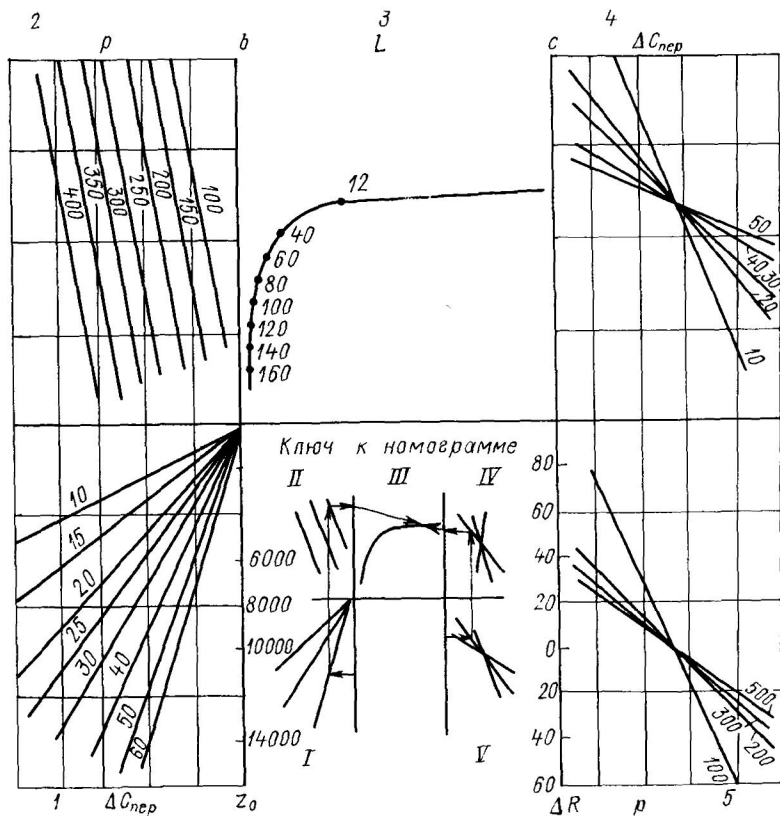


Рис. 5.9. Номограмма для расчета области эффективного использования электромобилей

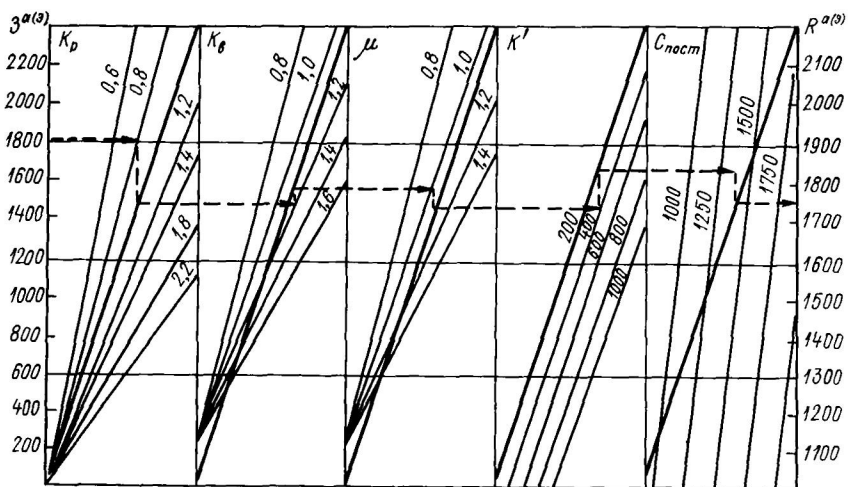


Рис. 5.10. Номограмма для расчета приведенных затрат при оценке эффективности электромобилей

зарядки происходит некоторое снижение срока службы аккумуляторных батарей, а при внутрисменной замене батарей аккумуляторов следует учитывать дополнительные затраты, связанные с заменой источника тока, а также увеличение переменных затрат второго рода до величины

$$z'_0 = z_0 n_3.$$

Для анализа области эффективного использования электромобилей могут быть использованы графические методы, в том числе номограммы.

Достоинство номограмм (как любого другого графического метода расчета) состоит в наглядности, возможности решения задач при отсутствии аналитических зависимостей, простоте и малой трудоемкости расчетов. Они позволяют производить анализ номографируемых зависимостей, изучать взаимное влияние переменных.

Одна из номограмм для оценки области эффективного использования электромобилей приведена на рис. 5.9. Там же дан ключ к номограмме. Для того чтобы определить границу области эффективного использования электромобилей, необходимо на номограмме:

- 1) начиная с величины z_0 (I октант), отложить значения $\Delta C_{\text{пер}}$, p (II октант) и сделать засечку на оси b ;
- 2) начиная с оси ΔR , отложить в V и IV октантах соответственно значения p и $\Delta C_{\text{пер}}$, сделав засечку на оси c ;
- 3) соединив засечки на осях b и c кривой L (в V октанте), получим значения граничных пробегов, при которых экономи-

чески равновыгодно производить и использовать сравниваемые транспортные средства. При этом (как было отмечено выше) электромобили экономически целесообразно использовать в области

$$L_2 \geq L \geq L_1; L \geq 0,$$

когда разность переменных затрат положительна, и при $0 < L < L_2$, когда разность переменных затрат отрицательна.

Для упрощения расчетов отдельных составляющих выражения (5.2) могут быть построены другие вспомогательные номограммы. На рис. 5.10 показана номограмма для расчета постоянных составляющих $R_{\text{пост}}$. При построении номограммы введены следующие обозначения:

$$K_p = \frac{P_a + E_H}{P_3 + E_H} \quad \text{и} \quad K_B = P_3/P_a.$$

Штриховой линией на номограмме показан пример расчета.

5.3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Оптимизация параметров массы электромобилей. При анализе эффективности электромобилей необходимо определить такие параметры массы: аккумуляторной батареи электромобиля, перевозимого груза и их соотношения, при которых эксплуатировать электромобили экономически целесообразно, а также те значения конструктивных параметров, которые обеспечивают максимальный экономический эффект. Для исследования параметров массы и их соотношений в области эффективного использования электромобилей можно применять следующие выражения:

$$\mathcal{E} = \left[\Delta R + \Delta C_{\text{пер}p} \frac{G_B}{G_p + G_B} - z_0 \frac{G_B}{G_p} \right] \frac{A_3}{P_a + E_H};$$

$$\mathcal{E} = \left[\Delta C_{\text{пер}} \frac{pm}{1+m} + \Delta R - z_0 m \right] \frac{A_3}{P_a + E_H};$$

$$\mathcal{E} = \left[\Delta C_{\text{пер}} pn + \Delta R + \frac{z_0 n}{n-1} \right] \frac{A_3}{P_a + E_H}.$$

Численные значения массы батарей аккумуляторов и ее отношений к полной массе электромобиля n и расчетной массе m ,

соответствующие границе области эффективного использования электромобилей, можно определить с помощью зависимостей:

$$G_{Б1, 2}^r = \frac{[(\Delta R + p \Delta C_{пер} - z_0) G_p] \pm \sqrt{[(\Delta R + p \Delta C_{пер} - z_0) G_p]^2 - 4z_0 \Delta R G_p^2}}{2z_0}; \quad (5.37)$$

$$m_{1, 2}^r = \frac{(\Delta C_{пер} p + \Delta R - z_0) \pm \sqrt{(\Delta C_{пер} p + \Delta R - z_0)^2 + 4\Delta R z_0}}{2z_0}; \quad (5.38)$$

$$n_{1, 2}^r = \frac{(\Delta C_{пер} p - z_0 - \Delta R) \pm \sqrt{(\Delta C_{пер} p - z_0 - \Delta R)^2 + 4\Delta R \Delta C_{пер} p}}{2\Delta C_{пер} p}. \quad (5.39)$$

При оценке области эффективного использования электромобилей необходимо учитывать следующие ограничения, определяемые условиями прочности конструкции электромобиля:

$$\begin{aligned} G_B &\leq G_{B \max}; \\ L &\leq p \frac{m^r}{1 + m^r}, \end{aligned} \quad (5.40)$$

где $G_{B \max}$ и m^r — максимально допустимые значения и соотношения массы батареи и расчетной массы электромобиля, определяемые конструктивными и прочностными особенностями электромобиля.

Наибольший экономический эффект достигается при следующих значениях параметров массы и их соотношений:

масса аккумуляторной батареи

$$G_B = \frac{G_p \left(p - \sqrt{\frac{pz_0}{\Delta C_{пер}}} \right)}{\sqrt{\frac{pz_0}{\Delta C_{пер}}}}, \quad (5.41)$$

отношение массы батареи аккумуляторов к расчетной массе электромобиля

$$m = \sqrt{\frac{p \Delta C_{пер}}{z_0}} - 1, \quad (5.42)$$

отношение массы батареи к полной массе электромобиля

$$n = 1 - \sqrt{\frac{z_0}{p \Delta C_{пер}}}.$$

Влияние конструктивных и технико-экономических показателей на эффективность электромобилей. Приведенные выше в данной главе экономико-математические модели и зависимости позволяют определять область эффективного использования электромобилей и исследовать влияние на нее отдельных конструктивных параметров и технико-экономических показателей.

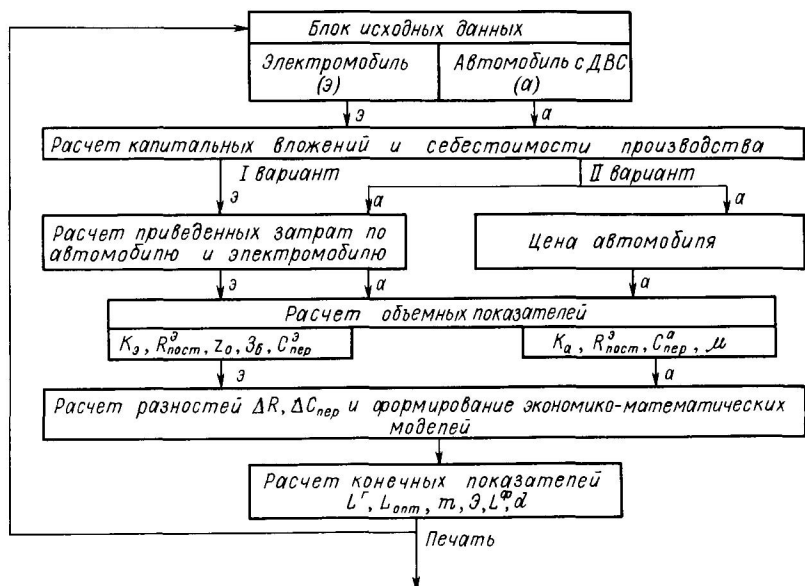


Рис. 5.11. Блок-схема расчета экономической эффективности электромобилей на ЭВМ

Однако такие расчеты оказываются весьма трудоемкими, так как при этом приходится использовать более 20 основных расчетных формул и зависимостей, содержащих элементы логарифмирования, возведения в степень, интегрального исчисления. Для оценки влияния отдельных показателей на эффективность электромобилей необходимо производить расчеты нескольких вариантов, что значительно увеличивает общую трудоемкость вычислительных работ. Все это обуславливает использование для расчетов современной вычислительной техники. С этой целью была разработана специальная программа на алгоритмическом языке «ФОРТРАН» для ЭВМ ЕС-1022, которая позволяет производить расчеты одновременно по четырем различным типам (грузоподъемностям) сравниваемых транспортных средств, двум вариантам и двум методикам — общепринятой и предлагаемой авторами в гл. 5.

Блок-схема расчетов приведена на рис. 5.11. Все расчеты выполняются в несколько этапов. На первом этапе формируется блок исходных данных, в которые входят:

- 1) грузоподъемность и масштабы производства сравниваемых транспортных средств (формы 1 и 2);
- 2) основные технико-эксплуатационные показатели электромобилей и применяемых источников тока (форма 1);

Таблица 5.4

Нормативные коэффициенты

№ п/п	Показатель	Вариант транспортного средства			
		1	2	3	4
1	Эффективность капитальных вложений	0,1500			
2	Приведение разновременных затрат	0,1000			

3) технико-эксплуатационные характеристики принимаемых за базу сравнения автомобилей (форма 2);

4) нормативные показатели (табл. 5.4).

На втором этапе, согласно этой же программе, проводятся следующие расчеты.

В начале определяются удельные капитальные вложения в производственную базу и себестоимость транспортных средств. При этом используются

выражения (5.3)—(5.15). На основе полученных данных определяются приведенные затраты. Расчеты ведутся по формуле (4.48). Далее вычисляются агрегированные показатели, такие как постоянная составляющая затрат по автомобилю и электромобилю, переменные затраты второго рода и приведенные затраты в источник тока. Для этого используются зависимости, приведенные на стр. 183. Затем рассчитываются разности постоянных и переменных затрат, являющиеся основой экономико-математической модели (5.2).

На последнем этапе проводятся следующие расчеты:

- 1) границы области эффективного использования электромобилей [расчетная формула (5.31)];
- 2) оптимального запаса хода [выражение (5.32)];
- 3) массы аккумуляторной батареи [зависимость (4.32)];
- 4) соотношения массы аккумуляторной батареи и расчетной массы электромобиля;
- 5) фактического запаса хода [выражение (5.40)];
- 6) экономического эффекта от использования электромобилей в расчете на 1 день работы;
- 7) возможной доли электромобилей в парке [выражение (5.24)].

Результаты расчетов выводятся на печать (формы 3, 4).

Согласно действующей методике расчеты экономической эффективности проводятся на объем производства новой техники. При сравнении эффективности автомобилей и электромобилей такой подход, по мнению авторов, будет недостаточно верным, так как в этом случае в связи с большими фактическими объемами производства автомобилей завышается их стоимостная оценка, производимая по уровню приведенных затрат, которые рассчитаны на значительно меньший объем производства электромобилей. В связи с этим более правильно приведенные затраты автомобилей исчислять в расчете на фактический объем производства или брать на уровне их оптовой цены. Такие расчеты предусматривают второй вариант.

Электромобиль

№ п/п	Показатель	Вариант транспортного средства			
		1	2	3	4
1	Грузоподъемность, т				
2	Годовой объем производства, тыс.				
3	Срок службы, лет				
4	Условная производительность, т				
5	Доля удельных капитальных вложений в производство				
6	Сопутствующие капитальные вложения				
7	Коэффициент себестоимости λ -2				
8	Коэффициент себестоимости λ -3				
9	Автомобиле-дни работы, дни				
10	Постоянные затраты по утвержденной методике				
11	Постоянные затраты по предлагаемой методике				
12	Переменные затраты, руб./км				
13	Удельная энергоемкость батарей, Вт·ч/кг				
14	Цена батарей, руб./т				
15	Срок службы батарей, циклы				
16	Коэффициент, учитывающий долю остаточной стоимости батарей				
17	Коэффициент, учитывающий допустимую степень ряда батарей				
18	Затраты на обслуживание батарей, руб./(кВт·ч·цикл)				
19	Число циклов работы в год				
20	Удельные затраты энергии, кВт·ч/(т·км)				
21	Цена электроэнергии за 1 кВт·ч, руб.				
22	КПД зарядного устройства				
23	Коэффициент удешевления электропривода				
24	Нормируемые оборотные средства				
25	Коэффициент использования грузоподъемности				
26	Норма запаса батарей				
27	Максимальное значение m (отношение массы аккумуляторной батареи к массе электромобиля)				

Автомобиль с ДВС

№ п/п	Показатель	Вариант транспортного средства			
		1	2	3	4
1	Грузоподъемность, т				
2	Годовой объем производства, тыс.				
3	Срок службы, лет				
4	Условная производительность, т				
5	Удельная мощность двигателя, кВт·ч/т				
6	Объем цилиндров, л				

№ п/п	Показатель	Вариант транспортного средства			
		1	2	3	4
7	Коэффициент тары				
8	Диапазоны передаточных чисел коробки передач				
9	Максимальный крутящий момент, Н·м				
10	Масса радиатора, кг				
11	Объем топливного бака, л				
12	Масса карданных шарниров, кг				
13	Сопутствующие капитальные вложения, руб.				
14	Постоянные затраты по утвержденной методике				
15	Постоянные затраты по предлагаемой методике				
16	Переменные затраты, руб./км				
17	Автомобиле-дни работы, дни				
18	Нормируемые оборотные средства, руб.				
19	Цена автомобиля, руб.				
20	Коэффициент использования грузоподъемности				

Первый вариант расчетов правомерно использовать в тех случаях, когда речь идет об альтернативе производства новых образцов автомобилей и электромобилей при определенной их специализации.

Форма 3

Характеристика области эффективного использования электромобилей и их основные конструктивные параметры

Утвержденная методика

Первый вариант расчета

№ п/п	Показатель	Вариант транспортного средства			
		1	2	3	4
1	Граница области эффективного использования электромобилей, км				
2	Оптимальный запас хода, км				
3	Доля электромобилей в парке				
4	Экономический эффект (руб. на 1 км пробега): составляющая $\Delta C_{пер}$ составляющая ΔR составляющая z_0				
5	Расчетная масса электромобиля, т				
6	Собственная масса без аккумуляторной батареи, т				
7	Отношение массы батареи к расчетной массе электромобиля				
8	Фактический запас хода L^{Φ} , км				

**Характеристика области эффективного использования
электромобилей и их основные конструктивные параметры**

Утвержденная методика

Второй вариант расчета

№ п/п	Показатель	Вариант транспортно-го средства			
		1	2	3	4
1	Граница области эффективного использования электромобиля, км				
2	Оптимальный запас хода, км				
3	Доля электромобилей в парке				
4	Экономический эффект, руб. на 1 км пробега: составляющая $\Delta C_{пер}$ составляющая ΔR составляющая z_0				
5	Расчетная масса электромобиля, т				
6	Собственная масса без батарей, т				
7	Отношение массы батарей к расчетной массе электромобиля				
8	Фактический запас хода L^{Φ} , км				

В связи с этим программой предусмотрены как первый, так и второй варианты расчетов.

В целях анализа влияния различных факторов на область эффективного использования электромобилей программой также предусмотрена возможность последовательной корректировки исходной информации или последнего расчетного варианта.

На последующих графиках показано влияние на область эффективного использования электромобилей различных конструктивных и технико-экономических показателей.

На рис. 5.12 показано изменение границы области эффективного использования электромобилей в зависимости от грузоподъемности транспортных средств. Анализ графика позволяет сделать вывод, что с увеличением грузоподъемности значительно снижается область эффективного использования электромобилей. Это ведет к понижению таких показателей, как доли электромобилей в парке, величины оптимального запаса хода и среднего экономического эффекта.

Следует отметить, что электромобилям грузоподъемностью 0,4 т не хватает запаса хода, чтобы покрыть всю область их эффективного использования. В связи с этим должны быть проведены мероприятия по увеличению запаса хода.

На рис. 5.13 показано изменение области эффективного использования электромобилей от масштабов их годового производства.

Из графиков следует, что при расчетах по первому варианту с увеличением объемов производства область эффективного использования электромобилей в начале несколько снижается, а затем наблюдается постоянный ее рост. Это обусловлено тем, что при небольших объемах производства затраты на производство автомобилей снижаются быстрее, чем затраты на изготовление электромобилей. При больших же объемах производства, наоборот, затраты на производство электромобилей снижаются более интенсивно.

Расчеты по второму варианту показывают постоянный рост эффективности электромобилей с увеличением их годового производства.

На рис. 5.14 представлена зависимость границы области эффективного использования электромобилей от величины удельной энергоемкости аккумуляторной батареи при прочих равных условиях. Из графика следует, что удельная энергоемкость аккумуляторной батареи сильно влияет на область эффективного использования электромобилей и что ее повышение — одно из наиболее перспективных направлений роста их эффективности.

На рис. 5.15 показана зависимость границы области эффективного использования электромобилей от удельной цены источника тока. Анализ показал, что снижение удельной цены источника тока является наиболее перспективным направлением повышения эффективности электромобилей с новыми химическими источниками энергии типа никель—водород, цинк—хлоридрад и других, которые имеют высокую удельную стоимость при современных технико-эксплуатационных показателях.

Влияние срока службы источника тока и электромобиля на границу области эффективного использования показано на

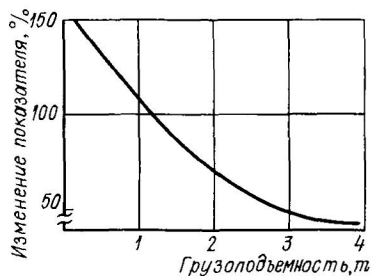


Рис. 5.12. Влияние грузоподъемности на область эффективного использования электромобилей

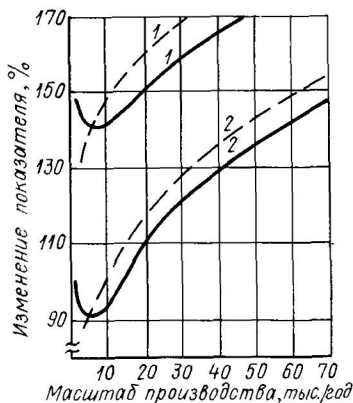


Рис. 5.13. Влияние масштабов производства на область эффективного использования электромобилей грузоподъемностью:

1 — 0,4 т; 2 — 1,0 т; 3 — 2,5 т;

— по первому варианту расчета; - - - по второму варианту расчета

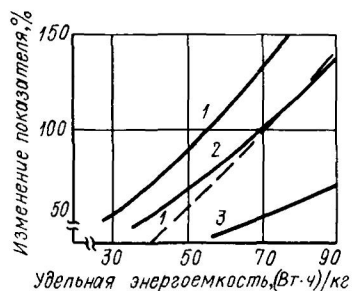


Рис. 5.14. Влияние удельной энергоёмкости источника тока на область эффективного использования электромобилей грузоподъемностью:

1 — 0,4 т; 2 — 1,0 т; 3 — 2,5 т;

— — по первому варианту расчета; - - - - по второму варианту расчета

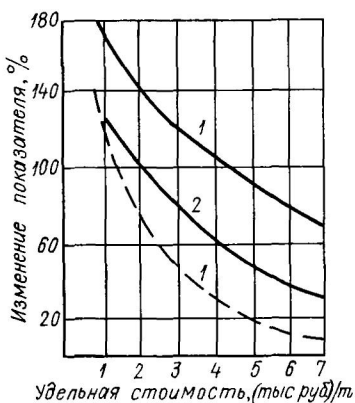


Рис. 5.15. Влияние удельной стоимости источника тока на область эффективного использования электромобилей грузоподъемностью:

1 — 0,4 т; 2 — 1,0 т

— — по первому варианту расчета; - - - - по второму варианту расчета

рис. 5.16 и 5.17. Из рисунков следует, что по своему характеру зависимости получились одинаковыми, т. е. вначале наблюдается их резкий рост, а затем эта тенденция значительно ослабевает. Основной прирост эффективности электромобилей наблюдается при увеличении срока службы электромобилей до 8—12 лет.

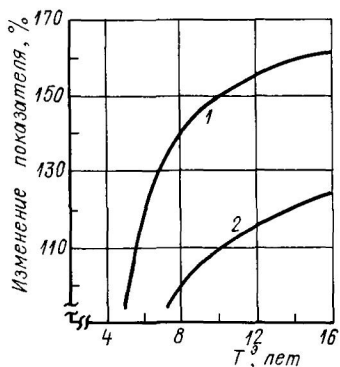


Рис. 5.16. Влияние срока службы электромобиля на область его эффективного использования при его грузоподъемности:

1 — 0,4 т; 2 — 1,0 т

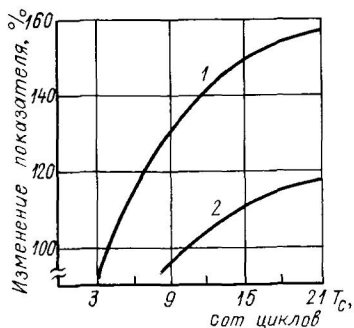


Рис. 5.17. Влияние срока службы аккумуляторной батареи на область эффективного использования электромобилей грузоподъемностью:

1 — 0,4 т; 2 — 1,0 т

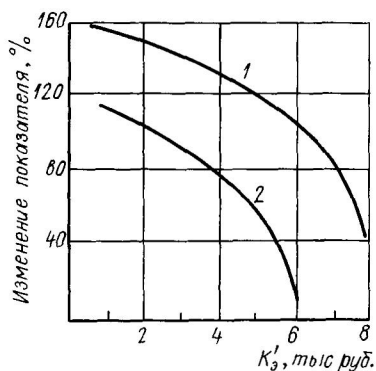


Рис. 5.18. Влияние величины сопутствующих капитальных вложений на область эффективного использования электромобилей грузоподъемностью:

1 — 0,4 т; 2 — 1,0 т

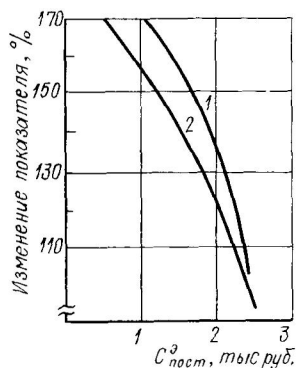


Рис. 5.19. Влияние величины постоянных затрат на область эффективного использования электромобилей грузоподъемностью:

1 — 0,4 т; 2 — 1,0 т

Увеличение срока службы более 14—16 лет (согласно полученным расчетам) не приводит к существенному увеличению их эффективности. Существенный прирост области эффективного использования электромобилей происходит при увеличении срока службы источника тока до 9—12 сотен циклов.

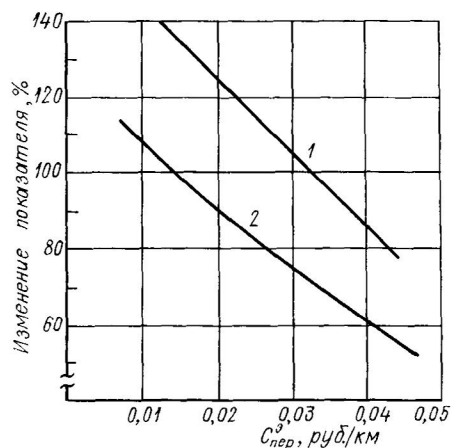


Рис. 5.20. Влияние величины переменных затрат на область эффективного использования электромобилей грузоподъемностью:

1 — 0,4 т; 2 — 1,0 т

Срок службы химических источников тока значительно влияет на область эффективного использования электромобилей. Повышение срока службы батарей аккумуляторов является одним из перспективных мероприятий повышения эффективности электромобилей с новыми химическими источниками тока типа цинк — воздух, натрий — сера, литий — хлор, у которых срок службы, как правило, не превышает 150—300 циклов при сравнительно высокой их удельной стоимости.

Значительное влияние на область эффективного использования электромобилей ока-

зывает величина сопутствующих капитальных вложений. Это наглядно иллюстрируется графиком на рис. 5.18.

Влияние величины переменных и постоянных затрат на границу области эффективного использования электромобилей показано на рис. 5.19 и 5.20. Очевидно, что сокращение эксплуатационных затрат — перспективный путь повышения эффективности электромобилей.

Применение разработанной программы и использование ЭВМ позволяют изучить влияние и других конструктивных параметров и технико-экономических показателей на эффективность электромобилей и в каждом конкретном случае выбрать наиболее перспективный вариант.

5.4. ОБЛАСТЬ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ С ТОПЛИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ И КОМБИНИРОВАННЫМИ ЭНЕРГОСИЛОВЫМИ УСТАНОВКАМИ

ЭЛЕКТРОМОБИЛИ С ТОПЛИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ (ТЭ)

Несмотря на то, что (как было указано в гл. 2) ТЭ не имеют согласно настоящим оценкам перспективы использования в электромобиле промышленного производства, тем не менее на примере ТЭ уместно показать методику расчета экономической эффективности производства и использования электромобилей с рассматриваемым источником тока.

Для электромобилей с топливными элементами характерно то, что масса энергосиловой установки не изменяется при изменении ее энергоемкости, а увеличение запаса хода может быть достигнуто за счет увеличения массы топлива в топливных баках. Так как масса электромобиля в этом случае изменяется незначительно, то затраты второго рода при этом становятся переменными, зависящими в основном от пробега транспортного средства.

Экономический эффект от производства и использования электромобилей в этом случае может быть определен по формуле

$$\Theta = [R^a - R^3 + C_{\text{пер}}^a L - C_{\text{пер}}^3 L] \frac{A_a}{P_a + E_H}.$$

Экономико-математическая модель оценки эффективности электромобилей имеет вид

$$\frac{A_a}{P_a + E_H} [R^a - R^3 + C_{\text{пер}}^a L - C_{\text{пер}}^3 L] > 0. \quad (5.43)$$

Граница области эффективного использования электромобилей может быть определена по формуле

$$L^r = \frac{R^3 - R^a}{C_{\text{пер}}^a - C_{\text{пер}}^3}. \quad (5.44)$$

Анализ полученных выражений показывает, что можно выделить при оценке эффективности электромобилей с ЭХГ четыре основных варианта:

1) если постоянная составляющая и переменные затраты на электромобили ниже, чем на автомобили, то электромобили экономически целесообразны во всей сфере возможного их использования;

2) если постоянная составляющая по электромобиллям ниже, а переменные затраты выше, чем у автомобилей, то электромобили экономически целесообразно применять при пробегах менее граничных, определяемых на основе выражения (5.44);

3) если постоянная составляющая по электромобиллям выше, а переменные затраты ниже, чем у автомобилей, то электромобили с ЭХГ экономически целесообразно применять при пробегах более граничных;

4) если постоянная составляющая и переменные затраты по автомобилям ниже, чем у электромобилей, то последние применять экономически нецелесообразно.

Графическая интерпретация этих вариантов представлена на рис. 5.21. На литерных рисунках заштрихована область эффективного использования электромобилей.

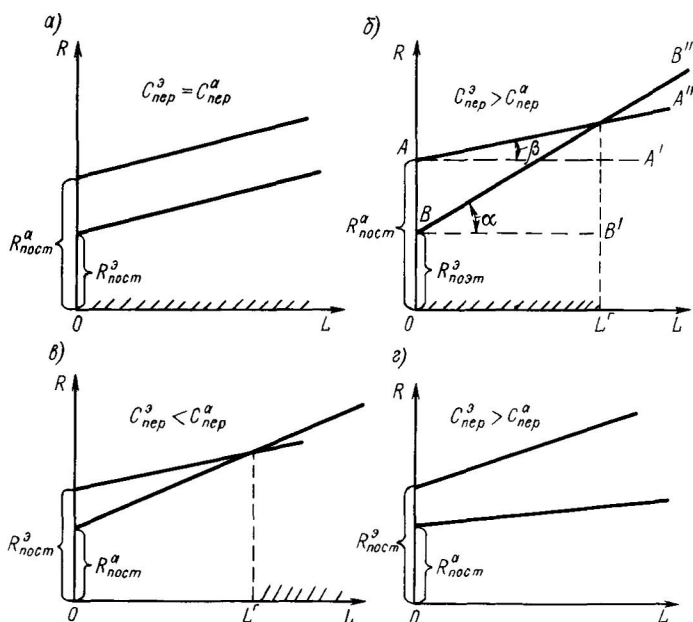


Рис. 5.21. Графическая интерпретация оценки области эффективного использования электромобилей с ЭХГ: а — $C_{пер}^э = C_{пер}^а$, $R_{пост}^а > R_{пост}^э$; б — $C_{пер}^э > C_{пер}^а$, $R_{пост}^а > R_{пост}^э$; в — $C_{пер}^э < C_{пер}^а$, $R_{пост}^э > R_{пост}^а$; г — $C_{пер}^э > C_{пер}^а$, $R_{пост}^э > R_{пост}^а$

Очевидно, что снижение постоянной составляющей и переменных затрат электромобиля с электрохимическим генератором (ЭХГ) ведет к увеличению их эффективности.

Полученные зависимости позволяют производить сравнительно-оценочные расчеты и анализировать мероприятия по увеличению эффективности электромобилей с топливными элементами. Предположим, что необходимо определить область эффективного использования электромобилей с ЭХГ типа водород — воздух. В табл. 5.5 приведены исходные данные, необходимые для сравнительной оценки эффективности электромобилей с ЭХГ, а в табл. 5.6 — данные о расходе топлива автомобилем с ДВС и электромобилем с ЭХГ.

Если принять стоимость энергосиловой установки электромобиля равной 2000 руб., срок ее службы — 5 годам, а остальные данные согласно табл. 5.5 и 5.6, то граница области эффективного

Т а б л и ц а 5.5

Исходные данные для расчета области эффективного использования электромобилей с топливными элементами типа водород—воздух

№ п/п	Тип транспортного средства, показатель	Численное значение показателя
Автомобиль с ДВС		
1	Приведенные затраты на производство одного автомобиля, руб.	5541,7
2	Сопутствующие капитальные вложения, руб.	1950
3	Эксплуатационные затраты:	
3.1	переменные в расчете на 1 км пробега, руб.	0,052
3.2	постоянные в расчете на 1 год, руб.	2423,9
4	Срок службы, лет	7
5	Автомобиле-дни работы за год, дни	300
6	Постоянная составляющая, руб.	4340
Электромобиль с ЭХГ		
1	Приведенные затраты с учетом стоимости энергоустановки, руб.	9185
2	Сопутствующие капитальные вложения, руб.	2500
3	Переменные затраты на 1 км пробега, руб.:	
3.1	без стоимости топлива	0,0097
3.2	включая стоимость топлива	0,0354
3.3	включая стоимость топлива и затраты на обслуживание источника тока	0,049
4	Постоянные затраты в расчете на 1 год, руб.	2648
5	Срок службы электромобиля, лет	10
6	Дни работы электромобиля за 1 год	300
7	Постоянная составляющая, руб.	4400

Примечания: 1. Приведенные затраты по автомобилю и электромобилю рассчитаны для масштабов производства 1000 ед. в год; 2. При расчете приведенных затрат по электромобилю учитывались путем дисконтирования дополнительные затраты на энергосиловую установку, так как срок ее службы условно принят, равным пяти годам.

Расход топлива грузовым автомобилем и электромобилем с водородно-воздушной энергоустановкой

Вид транспортного средства	Топливо		Норма расхода, л	Расход на 1 т. км
	Марка	Цена за 1 л, руб.		
Автомобиль УАЗ 451 ДМ	Бензин А 76 ГОСТ 2084—77*	0,15	15	0,15
Электромобиль	Водород ГОСТ 3022—80*	0,0002	—	112—145
Электромобиль	Водород жидкий	2,0 ¹	—	0,01—0,013

¹ Цена за 1 кг.

использования электромобилей согласно выражению (5.44) составит

$$L^r = \frac{R^s - R^a}{C_{\text{пер}}^a - C_{\text{пер}}^s} = \frac{4400 - 4340}{0,052 - 0,049} = 20 \text{ тыс. км.}$$

Учитывая, что постоянная составляющая по электромобилям выше, а переменные затраты ниже, чем у автомобилей, при пробегах менее 20 тыс. км в год (примерно 67 км в сутки) экономически целесообразно применять автомобили. При больших пробегах — экономически выгодно использовать электромобили с ЭХГ.

Границу области эффективного использования электромобилей с топливными элементами можно также определить графически, используя свойства линейной функции. Для этого на оси ординат необходимо отложить отрезок OA , равный затратам $R_{\text{пост}}^a$ (рис. 5.21, б), и через точку A провести параллельно оси абсцисс линию AA' , показывающую уровень постоянных затрат для автомобиля. Далее через точку A под углом β , используя равенство $\text{tg } \beta = C_{\text{пер}}^a$, следует провести линию AA'' , определяющую изменение переменных затрат с увеличением пробега.

Аналогично строится график расходов по электромобилю.

Проекция точки пересечения наклонных прямых AA'' и BB'' на ось абсцисс показывает границу области эффективного использования электромобилей с топливными элементами.

ОБЛАСТЬ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ С КОМБИНИРОВАННЫМИ ЭНЕРГОСИЛОВЫМИ УСТАНОВКАМИ

Запас хода электромобилей может быть увеличен путем комбинирования химических источников тока с другими источниками энергии. Согласно публикациям в этом направлении ведутся

работы широким фронтом. Можно привести примеры различных комбинаций источников тока. Рассмотрим наиболее известные из них.

Контактная сеть — двигатель внутреннего сгорания. Фирмой «Даймлер-Бенц» разработан вариант сочлененного городского автобуса OE 305G с двойным приводом. Для работы автобуса в центральной части города, где выбросы токсичных веществ автомобильным транспортом должны быть минимальными, используется электрическая энергия, поступающая от контактной сети.

На автобусе OE 305 G установлен тяговый электродвигатель фирмы «Бош», пиковая мощность которого составляет 180 кВт при рабочем напряжении 600 В. Для питания от контактной сети предусмотрены автоматические токосъемники.

При работе автобуса на окраинах города и в загородных зонах используется серийный дизель с автоматической коробкой передач. Между дизелем и коробкой передач установлена раздаточная коробка, через которую передается крутящий момент от дизеля или электродвигателя.

Аккумуляторная батарея — контактная сеть. Примером такой комбинации может служить система, предложенная фирмой «Транзит систем корпорейшен Вестберо» (*Transit System Corporation Westbero*, США). На электромобиле «Старкар» (*Starcar*) использовались аккумуляторные батареи, а также была предусмотрена возможность питания от внешнего источника энергии; электромобиль мог двигаться со скоростью 96 км/ч по специально оборудованной дороге с «третьим рельсом», питающим электроэнергией двигатель. От места стоянки до ближайшего пункта, где можно подключиться к электрофицированной дороге, источником питания служили аккумуляторные батареи. Затем электромобиль вливался в общий поток и в дальнейшем управлялся автоматически, для этого водитель должен был лишь набрать в управляющем устройстве пункт назначения. На специальных станциях не исключалась возможность дополнительной подзарядки аккумуляторных батарей.

По другому проекту, разработанному также в США, часть высокоскоростных автострад должна быть оборудована электроприводами типа троллейбусных, подключившись к которым электромобиль может двигаться, управляясь, возможно, автоматически, с большой скоростью и не расходуя энергии аккумуляторов, а может быть даже пополняя ее.

Аккумуляторная батарея — солнечная батарея. Такую комбинацию источников энергии предложили туркменские ученые. Аккумуляторные батареи электромобиля днем в безоблачную погоду могут подзаряжаться от солнечных батарей, расположенных на крыше электромобиля. Максимальная скорость такого электромобиля составляет 50 км/ч, а запас хода — до 100 км.

Аккумуляторные батареи — топливные элементы. В конце 60-х и в начале 70-х годов в Англии и США был разработан ряд опыт-

ных образцов электромобилей с энергосиловыми установками такого типа.

Так, в Англии был создан на базе нидерландского автомобиля ДАФ-44 электромобиль со смешанной системой питания от аккумуляторных батарей и от гидрозинно-воздушных топливных элементов с удельной мощностью 160 Вт/кг. При работе в режиме разгона такого электромобиля основная нагрузка ложится на аккумуляторные батареи, в других же режимах в работу вступают топливные элементы, подзаряжая батарею аккумуляторов.

В США был изготовлен электромобиль на базе английского легкового автомобиля «Остин А-40» (*Austin A-40*) с комбинированной системой, включающей щелочные водородно-воздушные элементы и свинцово-кислотные аккумуляторные батареи. Согласно данным опытной эксплуатации запас хода такого электромобиля достигает 320 км.

По результатам опытной эксплуатации были сделаны выводы о целесообразности применения таких электромобилей в городских условиях. Также было отмечено, что существуют значительные возможности по усовершенствованию комбинированной энергосистемы для городского электромобиля, которые позволяют снизить ее массу, повысить долговечность и отдачу энергии.

Аккумуляторная батарея — двигатель внутреннего сгорания. В ноябре 1972 г. в Токио начал курсировать электробус, изготовленный автомобильной фирмой «Исудзу моторс» (*Isudsu Motors*). На нем используется комбинированная установка, включающая низкотоксичный дизель, генератор переменного тока, силовой выпрямитель, электродвигатель постоянного тока, аккумуляторную батарею и ряд других агрегатов.

Целесообразность применения комбинированной установки заключается в том, что ДВС эксплуатируется при постоянном режиме работы. Это повышает его экономичность, увеличивает долговечность, снижает токсичность отработавших газов и уровень шума двигателя, а также позволяет более эффективно использовать систему очистки отработавших газов. Во время движения электробуса генератор переменного тока через выпрямитель питает тяговый электродвигатель постоянного тока. Одновременно ведется подзарядка аккумуляторной батареи, включенной параллельно в электрическую сеть, что в значительной степени увеличивает запас хода электробуса.

Другим примером может служить опытный образец электромобиля, разработанный английской фирмой «Лукас», который был представлен на Бирмингемской выставке.

Электромобиль может работать на электрическом приводе от аккумуляторных батарей (при коротких пробегах в городе с последующей подзарядкой аккумуляторов через выпрямитель от бытовой осветительной сети); на электрическом приводе от генератора, связанного с бензиновым двигателем (при дальних пробегах); на механическом приводе от бензинового двигателя —

классическая схема привода автомобиля (при длительном движении с крейсерской скоростью на шоссе); на смешанном приводе, когда совместная работа электропривода и бензинового двигателя дает возможность реализовать максимальную мощность гибридной силовой установки и позволяет подзаряжать аккумуляторные батареи.

Принятая схема привода позволяет использовать блок аккумуляторных батарей меньшей массы, чем на электромобиле; получать экономию бензина при движении по шоссе; иметь более простое зарядное устройство.

На электромобиле смонтирована электрическая тормозная система с рекуперацией энергии торможения и обычная тормозная система.

Полная масса электромобиля 2240 кг. Максимальная скорость 137 км/ч при смешанном приводе, 120 км/ч при электрическом приводе и 113 км/ч при приводе от бензинового двигателя. Запас хода на электрическом приводе в городе 64 км.

Очевидно, возможны и другие комбинации энергетических установок. Наиболее перспективными, по оценке специалистов, являются установки с комбинацией двигателя внутреннего сгорания и аккумуляторных батарей.

Оценка экономической эффективности электромобилей с методической точки зрения не представляет каких-либо трудностей.

В то же время отсутствие данных опытной эксплуатации, стоимостных оценок производства электромобилей, а также ряда конструктивных параметров не позволяет выполнить расчеты экономической эффективности по каждому из рассматриваемых вариантов. Однако уже в настоящее время имеется пример оценки экономической эффективности электромобилей с комбинированными силовыми установками последнего типа.

Расчеты были выполнены в институте комплексных транспортных проблем Р. М. Оганесяном. На рис. 5.22 и 5.23 показаны результаты расчетов области эффективного использования грузовых электромобилей с комбинированными энергосиловыми установками, аккумуляторных электромобилей и автомобилей с ДВС, а также электробусов и автобусов.

Из рисунков следует, что область рационального применения грузовых электромобилей и электробусов возрастает с увеличением грузоподъемности и вместимости. Однако это увеличение не пропорционально и не всегда соответствует требуемому запасу хода.

Существует мнение, что широкое внедрение электромобилей с комбинированными энергосиловыми установками не только решит задачу полной «очистки» воздушного бассейна в городах и производственных зонах, но и улучшит условия эксплуатации и безопасность движения на улицах и дорогах, поскольку взаиморезервирование двух приводов и автоматизация управления ими существенно повысят эксплуатационную надежность машин, снизят вероятность аварий и простоев.

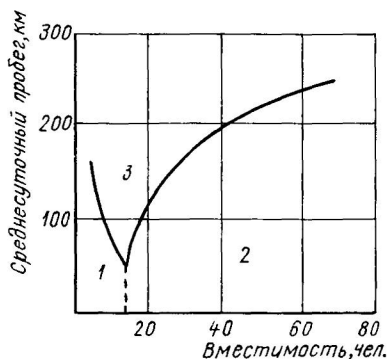
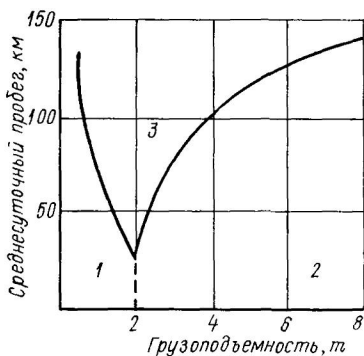


Рис. 5.22. Область рационального использования грузовых электромобилей: 1 — аккумуляторные электромобили; 2 — электромобили с комбинированными энергосиловыми установками (КЭУ); 3 — автомобили с ДВС

Рис. 5.23. Область рационального применения электробусов:

1 — аккумуляторные электромобили; 2 — электромобили с КЭУ; 3 — автомобили с ДВС

Освоение «гибридных» электромобилей несомненно облегчит перестройку производства как на заводах-изготовителях, так и в автотранспортных предприятиях, а в дальнейшем — полный переход на «чистые» электромобили, когда будут созданы аккумуляторы (или иные автономные источники электрической энергии) достаточно высокой энергии, надежности и низкой стоимости.

5.5. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОБУСОВ И ЛЕГКОВЫХ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ-ТАКСИ

В гл. 1 было отмечено, что в последние годы разработки и поиски в области создания надежных и эффективных электробусов ведутся так же интенсивно, как и по другим типам электрических автомобилей. Только в СССР в последние годы создан ряд электробусов небольшой вместимости. В Москве проходят испытания электромобили-такси, созданные на заводе микроавтобусов имени XXV съезда КПСС (г. Елгава). Чтобы обеспечить требуемый запас хода, маршрутные такси имеют ряд точек промежуточной подзарядки. Скорость их вполне достаточна для городских условий; она достигает 60 км/ч. На электробусах, созданных на базе микроавтобуса РАФ, в целях увеличения их запаса хода испытываются водородно-воздушные топливные элементы. Работы над их созданием ведутся во Всесоюзном научно-исследовательском институте источников тока под руководством члена-корреспондента Академии наук СССР Н. Лидоренко.

Опытная эксплуатация электробусов различной вместимости ведется и в других странах мира, в том числе в ФРГ, Японии, Италии. Созданные опытные образцы позволяют судить о перспективности этого вида пассажирского транспорта.

Нужно отметить, что оценка эффективности электробусов и легковых электромобилей не имеет принципиального отличия

Оценка экономической эффективности электробусов

Показатель	Автобус малой вместимости	Электробус
Эксплуатационные расходы		
Расходы, зависящие от объема перевозок, руб./1 машино-км	1,16	0,6
Содержание станции зарядки электробусов в год в расчете на один электробус, тыс. руб.	—	0,09
Содержание конечной станции в год, тыс. руб.	8,0	8,0
Себестоимость перевозок на 1 пасс·км, руб.	1,10	0,47
Капиталовложения		
Стоимость единицы подвижного состава, тыс. руб.	3,95	6,00
Стоимость одного места гаража, тыс. руб.	5,8	5,8
Стоимость конечной станции, тыс. руб.	36,0	36,0
Стоимость станции подзарядки в расчете на 1 электробус, тыс. руб.	0,546	1,16
Капиталовложения с учетом нормативного коэффициента эффективности капиталовложений в расчете на 1 пасс·км, руб.	0,546	1,16
Приведенные удельные строительно-эксплуатационные расходы на 1 пасс·км, руб.	1,646	1,643

от изложенной выше. В данном случае вместо параметра грузоподъемность электроавтомобиля следует использовать показатель «вместимость» электробуса или электроавтомобиля-такси.

При этом следует уточнить также соотношение вместимости транспортного средства и его массы G_p , а также учесть возможное переполнение электробуса при эксплуатации. В остальном же расчеты можно выполнять по формулам, аналогичным для грузовых электроавтомобилей.

В настоящее время имеются примеры оценки эффективности использования электробусов, в частности в СССР. Приведем один из них. Он выполнен В. П. Ковригой и Е. Е. Отдельновой [18]. Результаты таких расчетов приведены в табл. 5.7.

Для расчета приведенных удельных затрат приняты размер пассажиропотока, равный одной тысяче пассажиров в час во время «пик»; эксплуатационная скорость 18 км/ч; среднее время в наряде 12 часов; коэффициент выпуска подвижного состава на линию 0,85 и среднесуточный коэффициент наполнения транспортных средств, равный 0,3.

Согласно приведенным расчетам использование электробусов (в данном варианте) экономически более целесообразно в сравнении с автобусами той же вместимости. Критерием эффективности в данном случае выбраны удельные строительно-эксплуатационные расходы в расчете на 1 пассажиро-километр

Глава 6. УЧЕТ СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

6.1. АНАЛИЗ СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА РАЗВИТИЕ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Эффективность техники в условиях научно-технического прогресса зависит от реализации требований технического, экологического, психологического и эстетического характера. Обеспечение указанных требований прямо или косвенно влияет на экономическую эффективность техники.

Всесторонний подход к проблеме создания и оценки эффективности электромобилей предполагает изучение и анализ указанных факторов в отдельности. В связи с этим остановимся на каждом из них подробнее.

Технический фактор. Техническое совершенство электромобилей проявляется в дальнейшем улучшении конструкции и технологии их изготовления.

Конструктивное совершенство предполагает:

уменьшение (по сравнению с автомобилем) деталей, узлов и агрегатов, так как у электромобиля отсутствует двигатель внутреннего сгорания, система охлаждения с массивным радиатором, а также довольно часто коробка передач, сцепление, механическая трансмиссия;

меньшее число кинематических пар в узлах и агрегатах, требующих высокой точности изготовления а также сопряженных деталей, испытывающих высокие удельные давления, температуры и контактные напряжения;

компактность, за счет упрощения конструкции рамы, шасси и формы кузова и равномерного распределения нагрузки.

Перечисленные преимущества электромобиля во многом обусловлены применением электрического привода, к достоинствам которого следует отнести:

гибкость, т. е. возможность простого и удобного подвода электрической энергии к электродвигателю;

более удовлетворительную тягово-динамическую характеристику электродвигателя по сравнению с двигателем внутреннего сгорания, что особенно важно при их эксплуатации в условиях города (частые остановки, разгон и торможение);

широкие возможности выбора и применения компоновочных схем (возможен отдельный привод двух или четырех колес, что особенно важно для обеспечения безопасности при движении по скользкой дороге и на поворотах);

чистоту, простоту в обслуживании и ремонте; более высокий КПД, чем в ДВС; возможность доступной автоматизации, большой срок службы и т. п.

Конструктивные преимущества электрических автомобилей порождают ряд технологических достоинств:

сокращение количества производственных операций и (как следствие) производственного цикла, а также уменьшение трудоемкости;

применение более простого и дешевого оборудования в связи с возможностью использования деталей с более низким классом точности и чистоты обработки;

большие возможности автоматизации производственных процессов.

Сказанное относится в полной мере как к производству, так и к техническому обслуживанию и ремонту электрических автомобилей.

Перечисленные преимущества электромобилей способствуют снижению затрат как в сфере производства, так и в сфере эксплуатации, а также косвенно в некоторых сопряженных отраслях, например нефтедобывающей и перерабатывающей промышленности.

Несовершенство современных источников тока для электромобилей существенно снижает многие из приведенных их достоинств.

Выше было отмечено, что в дальнейшем ожидается создание более энергоемких, надежных и сравнительно дешевых источников тока. Это позволит реализовать преимущества электромобилей. В то же время расчеты, приведенные в гл. 5, показывают, что уже сегодня электромобили могут найти в народном хозяйстве обширную область применения, которая по мере совершенствования источников тока постоянно будет увеличиваться.

Экологический фактор. Повышение экологичности техники, особенно автомобильного транспорта, являющегося основным загрязнителем воздушной среды, обусловлено решением следующих задач: рационального использования природных ресурсов и комплексной утилизации отходов; обеспечения природного равновесия; защиты атмосферы, био-, гидро- и геосферы от загрязнения отходами производства; управления воспроизводством и эволюцией природы как условиями жизни и развития человека и общества.

Рациональное использование природных ресурсов. Необходимость рационального использования природных ресурсов обусловлена их ограниченностью на Земле. Следует отметить, что многие виды природных ресурсов, особенно это касается топливно-энергетических, являются невозполнимыми. Это относится и к нефти, примерно 40 % добычи которой перерабатывается в бензин и используется в качестве топлива для автомобилей с ДВС.

Проводимые многими авторами прогнозы наличия запасов минеральных топливно-энергетических ресурсов показывают, что наибольший удельный вес приходится на уголь, а запасы нефти в мире значительно ограничены. Так, по оценке, проведенной академиком И. В. Мельниковым, на долю угля приходится 80 %, нефти и природного газа 10 % запасов минеральных ресурсов.

Рост общего потребления энергии в мире происходил последние 25—30 лет, главным образом, за счет нефти. При этом темпы добычи нефти были весьма высоки.

Распределение мировой добычи нефти в миллионах тонн по годам приводится ниже.

1950	1521
1975	2645
1976	2858
1977	2962
1979	3000

Сопоставляя темпы роста потребления топливно-энергетических ресурсов и темпы роста удельного веса нефти, в общем объеме используемых энергоресурсов, а также их запасы, можно сделать вывод, что запасы нефти на Земле значительно ограничены, а темпы ее потребления постоянно возрастают, поэтому вопрос об исчерпаемости ее запасов становится весьма актуальным. Это подтверждается данными ряда авторов. Так, согласно расчетам, выполненным Г. Люстингом, нефти человечеству хватит до 2100 г. По оценке Массачусетского технологического института при современном объеме потребления нефти на земном шаре ее хватит на 300 лет, а в случае пятикратного увеличения разведанных запасов, но с учетом наметившегося прироста потребления — на 500 лет.

В последние десятилетия наблюдается тенденция роста цен на нефть и нефтепродукты как за рубежом, так и в СССР. Так, цена за 1 л бензина марки А-72 в нашей стране повысилась за период с 1976 г. по настоящее время с 5,2 до 30 коп., а марки А-76 — с 6 до 30 коп. Повышение цен на бензин в Советском Союзе связано с ростом капиталоемкости и снижением фондоотдачи в добывающей и нефтеперерабатывающей промышленности, что в значительной степени обусловлено неблагоприятными горно-геологическими и природно-климатическими условиями в районах добычи нефти.

Мировые цены на нефть и газ выше внутренних замыкающих оценок и сохраняют устойчивую тенденцию к повышению: эта тенденция, очевидно, будет сохраняться.

Ограниченность мировых запасов нефти и сопутствующая этому нестабильность цен на нефтепродукты выдвигают проблему поиска иных источников энергии для автомобильного транспорта. Своевременный и постепенный перевод автомобилей на новые источники энергии, в том числе применение электромобилей, позволит в дальнейшем без значительных экономических затрат резко ограничить потребление нефтепродуктов, увеличив тем самым продолжительность их использования для тех случаев, когда они не могут быть легко заменены другими источниками энергии.

Обеспечение природного равновесия. При современных масштабах интенсивного производства природа уже не может самостоятельно восстанавливать экологическое равновесие. В настоящее время появляется опасность нарушения биопродуктивной

цепи: солнце—растения—животные—растения, так как сейчас на Земле образуется больше углекислоты, чем ее могут ассимилировать растения. Это подтверждается следующими данными [17]. В атмосфере постоянно находится 2×10^{12} т окиси углерода, а в океане — в 60 раз больше. В реакции фотосинтеза участвуют лишь $0,16 \times 10^{12}$ т, тогда как антропогенный «вклад» составляет $0,001 \times 10^{12}$ т. Установлено, что примерно за столетие (с 1860 по 1963 гг.) содержание двуокиси углерода (CO_2) в атмосфере возросло с 0,027 до 0,0323 %. Продолжение этого процесса может привести к глобальным изменениям в природе: увеличение доли CO_2 и уменьшение кислорода могут вредно повлиять на живые организмы. С другой стороны, увеличение CO_2 в атмосфере может привести к так называемому «парниковому эффекту», суть которого состоит в аккумулялировании тепла атмосферной Земли. При этом может повыситься температура воздуха, что приведет к изменению режима влагооборота (участятся засухи) и уменьшению площади морских полярных льдов. Все это будет иметь отрицательные экономические последствия.

Приведенные данные показывают актуальность своевременной замены ДВС другим источником энергии, так как автомобильный транспорт является одним из основных потребителей кислорода, а численность автомобилей на планете уже в 1980 г. составила более 380 млн. единиц, а по прогнозам к 2000 г. она достигнет 520 млн. автомобилей. Только один автомобиль за год использует кислородный рацион 20—30 чел. и в то же время он является мощным источником антропогенного вклада углекислоты. Широкое внедрение экологически чистых источников энергии на автомобильном транспорте, в том числе переход на электромобили, будет в определенной мере способствовать снижению вероятности отрицательных изменений на Земле и сопутствующего им экономического ущерба. Понятно, что речь здесь идет об одном из направлений в системе мер предотвращения неблагоприятных экологических последствий.

Защита атмосферы, биосферы от загрязнения отходами автомобильного транспорта. Известно, что основным источником загрязнения окружающей среды является автомобильный транспорт. На его долю приходится до 50 % от общего загрязнения воздушной среды, а в отдельных случаях и больше.

Особенностями автотранспорта (как источника загрязнения атмосферы) являются широкая распространенность и проникновение в самые отдаленные уголки страны, близость к людям и объектам, на которые он отрицательно воздействует.

В настоящее время установлено, что многие ингредиенты отработавших газов ДВС, а их насчитывается более ста, оказывают вредное воздействие на организм людей, растения, животный мир, а также приводят к порче и преждевременному старению различных построек, сооружений и памятников старины. Так, согласно наблюдениям доктора Брауна (США) в момент энергетического

кризиса в Сан-Франциско, когда продажа бензина сократилась на 10 % и в связи с этим снизилась интенсивность автомобильного движения, в городе на 33 % сократилась смертность от легочных заболеваний и на 17 % — от сердечно-сосудистых заболеваний. Однако, когда было снято ограничение на продажу бензина и восстановилось прежнее автомобильное движение, смертность и заболеваемость повысились до прежнего уровня.

Воздействие отдельных ингредиентов отработавших газов на организм человека весьма разнообразно. Так, окись углерода вызывает у людей головокружение, быструю утомляемость, раздражительность и другие болезненные симптомы. Вредное воздействие на человека начинает проявляться при концентрации в атмосфере CO более 1 мг/м³. На долю автомобильного транспорта приходится около 80 % антропогенных выбросов CO.

Вдыхание окислов азота вызывает эмфизему легких, а затем и их отек. Происходят изменения отдельных элементов крови, в особенности у детей, проживающих в районах города с высоким уровнем загрязнения воздушной среды. В крови таких детей увеличено число незрелых форм эритроцитов, изменена форма лимфоцитов. Проведенные обследования показали также нарушение функциональной активности центральной нервной системы.

Для человека NO_x токсичны при концентрациях 0,085 мг/м³. Примерно при таких же концентрациях начинает проявляться поражение отдельных видов растительности.

Действие таких составляющих отработавших газов автомобилей, как углеводороды (при концентрациях выше предельно допустимых) приводит к изменению функционального состояния центральной нервной системы, которое происходит в основном с подавляющим эффектом и с угнетением биопотенциалов головного мозга человека.

Следует заметить, что электромобиль при эксплуатации практически совсем не выделяет в атмосферу таких вредных веществ, как окислы углерода и углеводороды, которые оказывают отрицательное воздействие на здоровье людей, растительный и животный мир и в целом на окружающую среду.

Бензопирен способствует возникновению опухолей, особенно в ослабленных органах.

Основными представителями альдегидов, поступающих в атмосферный воздух с отработавшими газами автомобилей, являются формальдегид и акролеин. Предельно допустимая концентрация формальдегида — 0,012 мг/м³. Токсическое действие проявляется в поражении внутренних органов и в нарушении деятельности нервной системы, а также в нарушении системы дыхания и сердечной деятельности. Предельно допустимая концентрация акролеина составляет 0,03 мг/м³. Он отличается неприятным резким запахом. Воздействие его на организм человека изучено пока недостаточно.

Свинец поступает в атмосферу с отработавшими газами автомобильных двигателей в основном в виде аэрозоля неорганических

солей и окислов. Предельно допустимая концентрация свинца $0,7 \text{ мг/м}^3$. Длительный производственный контакт с выбросами свинца и его соединений, находящихся в воздухе, автоинспекторов, автомехаников и водителей обуславливает повышение содержания свинца в крови и моче (в два-три раза больше по сравнению с его количеством в организме людей других профессий). Отравление свинцом вызывает головную боль, утомляемость, нарушение сна. У детей возникает синдром астмы.

О широком распространении соединений свинца говорят следующие данные: на Всемирной специализированной выставке «ЭКСПО-75» демонстрировался кусочек айсберга высотой 30 метров, возраст которого около 1000 лет. Нижние слои его были чистыми, а в слоях, образовавшихся с 1940 г., было обнаружено увеличение примесей свинца, появившихся от отработавших газов автомобилей.

Загрязнение воздуха городов отработавшими газами автомобилей приводит к образованию фотоксидантов — веществ, обладающих сильными окислительными свойствами и оказывающих отрицательное воздействие на организм человека.

Таким образом, отработавшие газы автомобильных ДВС оказывают вредное воздействие на организм человека.

Здоровье и жизнь человека в социалистическом обществе — это богатство общества. Они не поддаются практически никакой стоимостной оценке (хотя и возможно измерить ущерб, например, от заболеваемости населения).

Все это выдвигает требование разработки комплекса мероприятий, предотвращающих загрязнение атмосферы выбросами токсичных веществ автомобильных ДВС.

Работы в этой области ведутся по нескольким направлениям, которые приводятся ниже.

1. Совершенствование ДВС и применение устройств, позволяющих снизить их токсичность. Это направление в значительной мере может быть реализовано прежде всего за счет снижения степени сжатия рабочей смеси в карбюраторных двигателях, применения форкамерного смесеобразования и дальнейшего совершенствования конструкций карбюраторов.

Сокращения вредных выбросов добиваются использованием таких устройств, как дожигатели или нейтрализаторы. Первые позволяют путем дожигания превратить токсичные выбросы в практически безвредные вещества, а вторые — поглощают токсичные вещества.

2. Использование присадок к бензину или замена его другими видами топлива.

Карбюраторные двигатели, работающие на бензине, являются в настоящее время наиболее токсичными энергетическими установками. Выбросы вредных веществ дизельными двигателями значительно ниже. Это обстоятельство и высокая топливная экономичность дизелей (удельный расход топлива которых на 30—

35 % меньше, чем у карбюраторных двигателей) определили в XI и XII пятилетках курс на высокие темпы дизелизации, особенно грузового автотранспорта. Так, если в 1980 г. число дизельных грузовых автомобилей составило 19,4 % от общего их производства, то в 1990 г. их удельный вес должен достигнуть 38 %.

В последние годы в Москве, Ленинграде, Ташкенте и других городах продолжает расти парк газобаллонных автомобилей, особенно перспективными из них являются автомобили, работающие на сжатом природном газе. Проводятся эксперименты по переводу карбюраторных ДВС автомобилей на новые виды топлива — метанол, водород и др. Все перечисленные мероприятия обеспечивают существенное снижение загрязнения воздушной среды, что особенно важно для крупных городов.

3. Мероприятия организационного характера. К ним следует отнести своевременную и качественную регулировку всех систем карбюраторных и дизельных двигателей.

Следует отметить, что из всего комплекса предлагаемых мероприятий в настоящее время нельзя выделить хотя бы одно, которое бы полностью решало проблему защиты окружающей среды от вредных выбросов автомобильного транспорта в той мере, как это может быть обеспечено использованием электромобилей и автомобилей, работающих на водородном топливе.

Также необходимо отметить, что реализация мероприятий по снижению выбросов токсичных веществ автомобильных ДВС сопровождается ростом затрат на их производство и эксплуатацию. Так, в США до 1970 г. эксплуатационные качества автомобилей улучшались при снижении себестоимости их производства. Однако, начиная с 1971 г., наблюдается повышение себестоимости производства автомобилей примерно на 10 % в связи с проведением мероприятий по ограничению эмиссии токсичных веществ с отработавшими газами [37].

К загрязнителям окружающей среды, присущим автомобильному транспорту, следует отнести шум, создаваемый при движении и работе автомобильных двигателей. Согласно данным, приводимым О. А. Ставровым [39], для электрических автомобилей характерны более низкие уровни шума при более благоприятном его спектре.

В настоящее время доказано, что шум неблагоприятно воздействует на человека, а автомобильный транспорт является наиболее мощным и самым распространенным источником шума в городах. Установлено, что на городских магистралях максимальные уровни шума достигают в настоящее время 90—95 дБ, причем эти величины имеют тенденцию роста, так как транспортные потоки в городах с каждым годом возрастают.

Считается, что шум в 85 дБ представляет собой средний критический уровень, превышение которого вредно для здоровья человека. Однако автотранспортный шум в 75 дБ также приводит к некоторым психофизиологическим изменениям в организме [44].

Таблица 6.1

Увеличение первоначальной стоимости городского автобуса в зависимости от уровня наружного и внутреннего шума

Уровни шума, дБ		Увеличение первоначальной стоимости автобусов, дол.		
наружного	внутреннего	Расчет фирм, выпускающих автобусы		Расчет ЕРА
		Не более	Не менее	
86	84	205	0	50
83	83	505	0	195
81	83	1683	0	380
80	80	2900	350	875
77	80	4200	650	1670
75	78	5500	950	3270

Таблица 6.2

Увеличение годовых эксплуатационных расходов на один автобус в зависимости от уровней наружного и внутреннего шума

Уровни шума, дБ		Увеличение годовых эксплуатационных расходов, дол.	
наружного	внутреннего	на топливо	на ТО и ТР
		86	84
83	83	0	70
81	83	0	140
80	80	145	305
77	80	300	520
75	76	890	830

Нарушение нормального отдыха после трудового дня может стать причиной хронического переутомления, вызывающего расстройство центральной нервной системы. Между возрастающим шумом в городах и увеличением количества нервных больных в ряде стран установлена прямая зависимость. Городской шум в определенной степени способствует возникновению гипертонической болезни, а непрерывное воздействие шума может стать причиной язвенных заболеваний.

Установлена зависимость между увеличением общей заболеваемости и продолжительностью проживания в шумных городских условиях. Шум больших городов является одной из причин снижения у людей остроты слуха и развития тугоухости. Он в значительной степени влияет на эффективность лечебного процесса и увеличивает время пребывания больных в лечебных учреждениях. При воздействии шума свыше 45 дБ уменьшается слуховая чувствительность, резко снижается умственная работоспособность, увеличивается продолжительность времени выполнения учебных заданий, повышается количество ошибок.

Интенсивный шум ведет к снижению производительности труда. По оценкам специалистов шум снижает работоспособность при умственном и физическом труде примерно на 60 % [47].

Мероприятия по снижению уровня шума от автомобилей обуславливают рост затрат на производство и эксплуатацию автомобилей. Это подтверждается данными обследования, проведенного ЕРА (агентством по охране окружающей среды) [24].

В табл. 6.1 и 6.2 приведены данные о повышении стоимости автобусов и эксплуатационных затрат в зависимости от уровней наружного и внутреннего шума.

Выполненные исследования по проблеме снижения шумового загрязнения городов транспортными потоками показали, что одним из наиболее эффективных путей ее решения является оптимизация режима движения транспортных потоков, а также применение подвижного состава с низким уровнем шума. В настоящее время отсутствует методика определения ущерба от шумового загрязнения городской среды. Однако определенные шаги в этом направлении сделаны в МАДИ [35], что позволяет в первом приближении подойти к определению ущерба от воздействия шума на население, находящегося на территории жилой застройки, который приводит к потере части национального дохода страны. В этом отношении применение электромобилей в транспортной системе страны позволило бы (при условии 10—15 % их участия в транспортных потоках городской среды) существенно снизить уровень шума, так как для электромобилей он составляет всего 37—43 дБ. Эти величины говорят о том, что электромобиль практически не создает шумового загрязнения, а это особенно важно для крупных городов, городов-курортов и др.

Таким образом, современный автомобильный транспорт, оснащенный ДВС, неблагоприятно воздействует на людей и окружающую среду. Проводимые в настоящее время мероприятия по снижению негативного воздействия не решают проблему полностью, а также приводят к повышению эксплуатационных затрат и стоимости транспортных средств. В связи с этим внедрение в настоящее время электромобилей (и по мере развития источников тока расширение сферы их применения) будет способствовать решению этой важной проблемы.

Физиологическая и психологическая функциональность при эксплуатации электромобиля. Оценка новой техники в значительной степени зависит от того, как она влияет на человека. Функциональные возможности человека в процессе производства определяются особенностями его физиологии и спецификой транспортного средства. По мере технического прогресса развивается противоречие между возможностями технического объекта и ограниченностью физиологических возможностей человека. Однако в этом аспекте электромобиль в силу того, что он имеет значительно (два-три раза) меньшее число рычагов управления при их простоте, значительно превосходит автомобиль с ДВС. В связи с этим у водителя появляется больше возможностей следить за дорожной ситуацией. Повышается эффективность функционирования системы человек — автомобиль — дорога.

В табл. 6.3 представлены данные о физических воздействиях, которые производит водитель при езде в городе.

Из таблицы следует, что сокращение количества воздействий на рычаги управления может значительно облегчить труд водителя, а также будет способствовать физиологической совместимости.

Количество воздействия на рычаги управления в зависимости от стиля езды

Контролируемый параметр, приведенный к 100 км пробега	Стиль езды			
	темпераментный		спокойный	
	«Москвич-2140»	ВАЗ-21011	«Москвич-2140»	ВАЗ-21011
Количество включений:				
сцепления	784	895	636	768
I передача	140	143	94	104
II передача	200	194	134	166
III передача	288	246	172	214
IV передача	117	177	159	196
Всех передач, тормозов	292	277	187	209

Кроме физиологической совместимости необходима психологическая адаптация человека к технике. Относительная простота конструкции электромобиля, легкость управления, «чувствительность» электромобиля к рычагам управления, хорошая плавность хода и обзорность способствуют быстрой адаптации человека к машине. Опрос водителей электромобилей, проведенный в Главмосавтотрансе, показал, что водители дают высокую оценку электрическим автомобилям.

Отсутствие вибраций, шума, отработавших газов улучшает производственно-техническую среду, способствует возникновению оптимального психологического климата. Установлено, что приспособление конструкции автомобиля только по факторам, характеризующим санитарно-гигиенические условия труда, может обеспечить увеличение производительности труда на 13 % и снижение числа дорожно-транспортных происшествий до 57 %.

Из сказанного выше следует, что при внедрении электромобилей не возникнет какой-либо психофизиологический барьер. Благодаря большей, чем для автомобиля с ДВС, физиологической функциональности (приспособленности) электромобиля, а также вследствие упрощения управления и меньшей трудоемкости, можно ожидать снижения дорожно-транспортных происшествий, что способствует значительному экономическому эффекту.

Таким образом, электромобили обладают рядом неоспоримых преимуществ перед автомобилями с ДВС, основным из которых является более благоприятное воздействие на человека и окружающую среду. Каждое из указанных преимуществ предопределяет конкретный вид эффекта. К сожалению, в настоящее время в связи с отсутствием необходимых методических разработок не каждый вид эффекта может быть определен в стоимостном выражении.

Однако уже сегодня имеются предпосылки для оценки экономической эффективности мероприятий, направленных на предотвращение загрязнения окружающей среды, в том числе от токсичных выбросов автомобильных ДВС. В связи с этим появляется возможность оценки экономической эффективности электромобилей с учетом экологической составляющей.

6.2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ УЩЕРБА, НАНОСИМОГО ТОКСИЧНЫМИ ВЫБРОСАМИ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

Одной из основных социально-экономических задач народного хозяйства нашей страны на современном этапе развития является совершенствование управления процессами воспроизводства и охраны окружающей среды. При этом охрана окружающей среды от загрязнения приобретает особое значение не только в социальном аспекте, но и как значительный фактор повышения эффективности общественного производства.

Выше было отмечено, что загрязнение атмосферы токсичными веществами (в том числе отработавшими газами автомобильных ДВС) вызывает повышенную заболеваемость населения, преждевременное старение различных сооружений, построек и т. д.

В настоящее время пока отсутствует единая методика оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству автомобильным транспортом. Это в значительной степени затрудняет расчеты экономической эффективности электромобилей с учетом экологической составляющей, т. е. с учетом снижения ущерба от загрязнения атмосферы токсичными веществами вследствие замены части автомобилей с ДВС электромобилями.

Однако уже сегодня имеются методические разработки и рекомендации по оценке ущерба, причиняемого отдельными промышленными загрязнителями. Такие разработки нашли отражение в исследованиях, выполненных О. Ф. Балацким, В. Г. Халдеевым и другими учеными.

Анализ показывает, что они могут быть положены в основу методических рекомендаций по оценке экономического ущерба, причиняемого токсичными выбросами автомобильного транспорта.

Структурными составляющими экономического ущерба, обусловливаемого загрязнением атмосферы и окружающей среды, являются: ущерб от повышенной заболеваемости населения, ущербы коммунальному хозяйству и промышленным объектам, а также сельскому и лесному хозяйству.

Комплексная оценка ущерба требует наличия большого статистического материала и сопровождается трудоемкими расчетами.

Наибольший удельный вес в комплексном ущербе приходится на здравоохранение, который в 1975 г. составлял 40 %. Значительный ущерб причиняется загрязнением коммунальному и бытовому хозяйству (более 30 %) и промышленности (примерно 10 %).

Существуют различные методы оценки экономического ущерба от загрязнения окружающей среды. В их числе можно назвать методы прямого счета, аналитический, нормативный и др.

Согласно методу прямого счета рассматриваются два района, расположенных примерно в одинаковых природно-климатических условиях и близких по другим своим характеристикам (контрольный район и район с повышенным загрязнением атмосферы). Изучаются потери (заболеваемость) в указанных районах, вызываемые загрязнителями атмосферы. Далее рассчитывается ущерб народному хозяйству от загрязнения атмосферы в районе с высокой концентрацией токсичных веществ в виде разности потерь по данным районам.

Аналитический метод используется в тех случаях, когда предварительно изучены зависимости экономического ущерба от уровня загрязнения окружающей среды и других факторов.

Используя такие зависимости, можно определить ущерб в районах с различным уровнем токсичных веществ в атмосфере.

Нормативный метод может быть применен в тех случаях, когда определены зависимости экономического ущерба в расчете, например, на единицу выбросов токсичных веществ. В этом случае экономический ущерб определяется умножением норматива на общий объем выбросов загрязнителей атмосферы.

Каждый из указанных методов может быть применен самостоятельно и в сочетании с другими. Выбор метода определяется характером и качеством исходной информации.

Наиболее опасным видом ущерба с социальной точки зрения является ущерб от повышенной заболеваемости населения в районах с высоким уровнем загрязнения окружающей среды.

Для расчета ущерба, причиняемого здравоохранению высоким уровнем загрязнения атмосферы токсичными веществами, могут быть использованы зависимости, изложенные в работе [7].

Ущерб, причиняемый повышенным содержанием:
оксида углерода

$$y_1 = e^{2,47} x_1^{0,55}; \quad (6.1)$$

оксида азота

$$y_2 = e^{3,07} x_2^{0,42}; \quad (6.2)$$

сернистого ангидрида

$$y_3 = e^{3,13} x_3^{0,36}; \quad (6.3)$$

пыли

$$y_4 = e^{3,62} x_4^{0,57}; \quad (6.4)$$

где y_i — ущерб здравоохранению, приходящийся на 1000 чел. при постоянной плотности населения, тыс. руб.; x_i — концентра-

ция соответствующего загрязнителя в единицах среднесуточной предельно допустимой концентрации (ПДК); e — основание натурального логарифма.

В. Г. Халдеевым предложена следующая зависимость между величиной удельного ущерба, причиняемого здравоохранению, и уровнем загрязнения атмосферы:

$$y = 142,4 - \frac{590,4}{x_0}, \quad (6.5)$$

где x_0 — уровень загрязнения атмосферы;
причем

$$x_0 = \frac{C_{CO}}{ПДК_{CO}} + \frac{C_{NO}}{ПДК_{NO}} + \frac{C_{SO}}{ПДК_{SO}} + \frac{C_{\Pi}}{ПДК_{\Pi}}. \quad (6.6)$$

Здесь C_{CO} , C_{NO} , C_{SO} , C_{Π} — средние годовые концентрации в атмосфере соответственно оксидов углерода и азота, сернистого ангидрида и пыли, $мг/м^3$; $ПДК_{CO}$, $ПДК_{NO}$, $ПДК_{SO}$, $ПДК_{\Pi}$ — предельно допустимые концентрации перечисленных ингредиентов в воздухе, $мг/м^3$.

При этом величина ущерба рассчитывается как сумма следующих издержек загрязнения: затрат на лечение в стационаре и в амбулаторных условиях; затрат на оплату больничных листов родителям в связи с болезнью детей; ущерба народному хозяйству от недоиспользования трудовых ресурсов.

Недостатком приведенных выражений является то, что они учитывают не все, а лишь отдельные и наиболее изученные по своему воздействию загрязнители атмосферы. Они устанавливают реально существующие зависимости между уровнем концентрации загрязняющих атмосферу веществ и ущербом, наносимым загрязнением. Очевидно, что со временем указанные зависимости и входящие в них величины будут уточняться. Однако уже сегодня они могут быть использованы при разработке методического подхода к оценке удельного ущерба, наносимого токсичными выбросами автомобилей с ДВС.

По мнению автора в методическом плане наиболее удачным является выражение (6.5), так как оно учитывает суммарное загрязнение атмосферы несколькими загрязнителями и взаимное влияние токсичных веществ на организм человека.

Для того чтобы определить ущерб, причиняемый автомобильным транспортом, необходимо выделить долю выбросов токсичных веществ, приходящихся на автомобильные ДВС.

По отдельным ингредиентам она составит:

$$K_{CO} = \frac{V_{CO}^a}{V_{CO}}; \quad K_{NO} = \frac{V_{NO}^a}{V_{NO}}; \quad K_{SO} = \frac{V_{SO}^a}{V_{SO}}; \quad K_{\Pi} = \frac{V_{\Pi}^a}{V_{\Pi}}, \quad (6.7)$$

где V_{CO}^a , V_{NO}^a , V_{SO}^a , V_{Π}^a — объем выбросов оксидов углерода и азота, двуокиси серы и пыли автомобильным транспортом в рас-

сма­три­вае­мом рай­оне, т; V_{CO} , V_{NO} , V_{SO} , V_{Π} — об­щие вы­бросы ука­зан­ных ин­гре­ди­ентов в дан­ном рай­оне, т.

Если вы­бросы ве­ществ в объ­емах V_{CO} , V_{NO} , V_{SO} , V_{Π} соз­да­ют кон­цен­тра­цию их в воз­ду­хе на уров­нях C_{CO} , C_{NO} , C_{SO} , C_{Π} , то уместно пред­по­ло­жить, что вы­бросы ав­то­мо­биль­но­го транс­порта V_{CO}^a , V_{NO}^a , V_{SO}^a , V_{Π}^a спо­соб­ствуют об­ра­зо­ва­нию кон­цен­тра­ции ука­зан­ных ве­ществ на уров­нях C_{CO}^a , C_{NO}^a , C_{SO}^a , C_{Π}^a , рас­счи­ты­вае­мых по фор­му­лам

$$\left. \begin{aligned} C_{CO}^a &= C_{CO} K_{CO}^a; \\ C_{NO}^a &= C_{NO} K_{NO}^a; \\ C_{SO}^a &= C_{SO} K_{SO}^a; \\ C_{\Pi}^a &= C_{\Pi} K_{\Pi}^a. \end{aligned} \right\} \quad (6.8)$$

Тогда ущерб, при­чи­няе­мый рас­сма­три­вае­мыми ин­гре­ди­ентами вы­бросов ав­то­мо­биль­но­го транс­порта, со­ставит

$$y_a = \left[\left(142,4 - \frac{590,4}{x_1} \right) - \left(142,4 - \frac{590,4}{x_2} \right) \right] \frac{1}{K_3},$$

или после пре­об­ра­зо­ваний по­лучим

$$y_a = 590,4 \frac{x_2 - x_1}{K_3 x_1 x_2}, \quad (6.9)$$

где K_3 — коэф­фи­циент, учи­ты­вае­щий до­лю э­ко­но­ми­че­ско­го ущер­ба, при­хо­дя­щую­ся на здра­во­охране­ние; x_1 — об­щий уровень за­грязне­ния ат­мо­сферы, опре­де­ляе­мый по фор­му­ле (6.6); x_2 — уровень за­грязне­ния ат­мо­сферы про­мыш­лен­ными вы­бросами без учета ав­то­мо­биль­но­го транс­порта.

При­чем

$$\begin{aligned} x_2 &= \frac{C_{CO}}{ПДК_{CO}} (1 - K_{CO}^a) + \frac{C_{NO}}{ПДК_{NO}} (1 - K_{NO}^a) + \\ &+ \frac{C_{SO}}{ПДК_{SO}} (1 - K_{SO}^a) + \frac{C_{\Pi}}{ПДК_{\Pi}} (1 - K_{\Pi}^a). \end{aligned} \quad (6.10)$$

Та­ким об­ра­зом, ис­поль­зуя за­ви­си­мо­сти (6.9) и (6.10), не­сложно оце­нить ве­ли­чину э­ко­но­ми­че­ско­го ущер­ба, при­чи­няе­мо­го на­род­но­му хо­зяй­ству в дан­ном рай­оне токсичными вы­бросами ав­то­мо­биль­но­го транс­порта.

Вы­бросы, про­из­во­ди­мые раз­личными ис­точ­никами, и кон­цен­тра­ции токсичных ве­ществ в ат­мо­сфере го­родов в на­сто­ящее время опре­де­ляются и учи­ты­ваются ги­дро­метеорологическими обсер­ва­то­риями, объ­еди­няе­мыми Го­су­дар­ствен­ным ко­ми­те­том СССР по ги­дро­метеорологии и кон­тро­лю при­род­ной сре­ды.

Ниже приведены значения ПДК (мг/м³) для наиболее характерных загрязнителей воздушной среды:

Оксид углерода	1,000
Оксид азота	0,085
Сернистый ангидрид	0,050
Пыль	0,150

При расчетах экономической эффективности электромобилей с учетом экономической составляющей необходимо иметь данные об отдельном ущербе, причиняемом автомобилями с ДВС, в расчете на единицу выбросов токсичных веществ или на 1 км пробега транспортного средства.

В настоящее время пока не существует должного учета и контроля за выбросами вредных веществ с отработавшими газами ДВС. Однако уже сегодня налажен контроль и нормирование топлива для автомобилей. Это позволяет установить взаимосвязь между пробегом автомобилей, расходом топлива, выбросами токсичных веществ и удельным пробегом.

Удельный ущерб в расчете на 1 л потребленного топлива может быть определен по формуле

$$y_{\text{л}} = y_{\text{а}}/(Q\rho), \quad (6.11)$$

где Q — масса топлива, потребленного автомобилями района (города) за год, т; ρ — плотность топлива, л/кг. Тогда ущерб в расчете на 1 км пробега заданной модели автомобиля с ДВС составит

$$y_{\text{км}} = Hy_{\text{л}} \cdot 10^{-2}, \quad (6.12)$$

где H — норма расхода топлива данной модели автомобиля, л/100 км.

Предлагаемый методический подход не исключает другие варианты расчета удельного ущерба, причиняемого токсичными выбросами автомобилей с ДВС.

Так, на основе приведенных зависимостей может быть определен удельный ущерб на единицу токсичных выбросов автомобилей. В этом случае на основе данных о выбросах токсичных веществ на 1 км пути можно определить удельный ущерб на 1 км пробега транспортного средства.

Следует отметить, что эффективность транспортных средств с учетом экономической составляющей может быть определена путем выравнивания базы сравнения, т. е. путем оценки и учета затрат, необходимых для понижения токсичности отработавших газов до уровня, не приносящего ущерба окружающей среде.

В этом случае при расчете экономической эффективности электромобилей необходимо учесть затраты на производство и эксплуатацию антитоксичных устройств для автомобилей с ДВС.

6.3. ОЦЕНКА ОБЛАСТИ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ С УЧЕТОМ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ

Экологическая составляющая экономического эффекта от использования электромобилей может быть определена как разность ущербов, причиняемых выбросами автомобилей с ДВС и электромобилей. Учитывая, что экономический ущерб от загрязнения атмосферы транспортными средствами может быть определен на 1 км их пробега, дополнительный эффект от использования электромобилей может быть рассчитан по формуле

$$\mathcal{E}_d = y_a L^a - y_э L^э, \quad (6.13)$$

где y_a и $y_э$ — удельный ущерб в расчете на 1 км пробега соответственно автомобилей и электромобилей, руб.; L^a и $L^э$ — годовые пробеги автомобилей и электромобилей, км.

Если пробеги транспортных средств равны, то расчетная формула примет вид

$$\mathcal{E}_d = (y_a - y_э) L = \Delta y L, \quad (6.14)$$

где Δy — разность удельных ущербов от загрязнения атмосферы токсичными выбросами автомобилей и электромобилей, руб./км.

С учетом изложенного выше выражение для расчета границы области эффективного использования аккумуляторных электромобилей примет вид

$$L_{1,2} = \frac{|z_0 + \Delta R - (\Delta C_{пер} + \Delta y) p| \pm \sqrt{[z_0 + \Delta R - (\Delta C_{пер} + \Delta y) p]^2 + 4 (\Delta C_{пер} + \Delta y) \Delta R p}}{2 (\Delta C_{пер} + \Delta y)}. \quad (6.15)$$

Граница области эффективного использования электромобилей с ЭХГ в этом случае может быть определена с помощью выражения

$$L = \frac{R_{пост}^a - R_{пост}^э}{\Delta C_{пер} + \Delta y}. \quad (6.16)$$

Оптимальный запас хода и масса аккумуляторной батареи могут быть определены по формулам:

$$L_{опт} = p - \sqrt{\frac{pz_0}{\Delta C_{пер} + \Delta y}}; \quad (6.17)$$

$$G_B = G_p \left(p - \sqrt{\frac{pz_0}{\Delta C_{пер} + \Delta y}} \right) / \sqrt{\frac{pz_0}{\Delta C_{пер} + \Delta y}}. \quad (6.18)$$

На основе предложенных зависимостей были определены границы области эффективного использования электромобилей различной грузоподъемности, а также основные весовые параметры, которыми будут обладать при этом электромобили. Результаты расчетов приведены в табл. 6.4 и на рис. 6.1 и 6.2. Оптимальные

Граница области эффективного использования электромобилей

Параметр	Грузоподъемность, т			
	0,4	1,0	2,5	4,0
I. Электромобили со свинцово-кислотной аккумуляторной батареей				
Удельная энергоемкость источника тока, Вт·ч/кг	30	30	30	30
Удельная стоимость, руб./т	900	900	900	900
Масса электромобиля без батарей аккумуляторов, кг	1080	1390	2150	2920
Срок службы источника тока, циклы	300	300	300	300
Годовой объем производства электромобилей, тыс. ед.	1,0	1,0	1,0	1,0
Граница области эффективного использования электромобилей, определенная по:				
утвержденной методике, км	41,0	3,0	0	0
предлагаемой методике, км	45,8	36,6	5,8	5,5
То же с учетом ущерба от отработавших газов ДВС по:				
утвержденной методике, км	96,8	56,0	13,3	10,7
предлагаемой методике, км	121,8	109,1	57,4	40,7
Фактический запас хода, км	73,3	68,5	64,4	63,4
II. Электромобили с никель-железной аккумуляторной батареей				
Удельная энергоемкость источника тока, Вт·ч/кг	40	40	40	40
Удельная стоимость, руб./т	1600	1600	1600	1600
Срок службы, циклы	1500	1500	1500	1500
Граница области эффективного использования электромобилей, определенная по:				
утвержденной методике, км	106,7	44,0	18,1	13,1
предлагаемой методике, км	98,1	76,3	19,2	13,7
То же с учетом ущерба от токсичных выбросов ДВС по:				
утвержденной методике	186,0	159,0	102,0	78,0
Фактический запас хода, км	97,7	91,3	85,9	84,0

параметры массы даны в табл. 6.5. Исходные данные к расчетам приведены также в табл. 6.4. Из расчетов следует, что область эффективного использования электромобилей со свинцово-кислотными аккумуляторными батареями очень мала и не превышает для электромобилей грузоподъемностью 0,4 т величины 45 км, а также практически равна нулю для электромобилей грузоподъемностью более 1,0 т. При этом наблюдается незначительное расхождение в расчетах по предлагаемой и утвержденной методикам.

Однако, если учитывать экономический ущерб, наносимый отработавшими газами автомобилей, то при использовании в боль-

ших городах электромобили можно эффективно эксплуатировать при пробегах до 60—80 км в зависимости от их грузоподъемности.

Несколько больше область эффективного использования электромобилей с никель-железными аккумуляторными батареями. Она превышает 100 км.

Из рис. 6.2 следует, что область эффективного использования электромобилей небольшой грузоподъемности с никель-железными аккумуляторными батареями ограничена запасом хода. Это же относится к электромобилям со свинцово-кислотными аккумуляторами при расчете области эффективного использования с учетом экономического ущерба, наносимого отработавшими газами автомобилей.

Кривые на рис. 6.1 и 6.2 и значения параметров массы хорошо аппроксимируются следующими зависимостями:

для электромобилей со свинцово-кислотными аккумуляторными батареями граница области эффективного использования (с учетом ущерба от токсичных выбросов ДВС)

$$L = 120,4 - 71,16q + 10,97q^2;$$

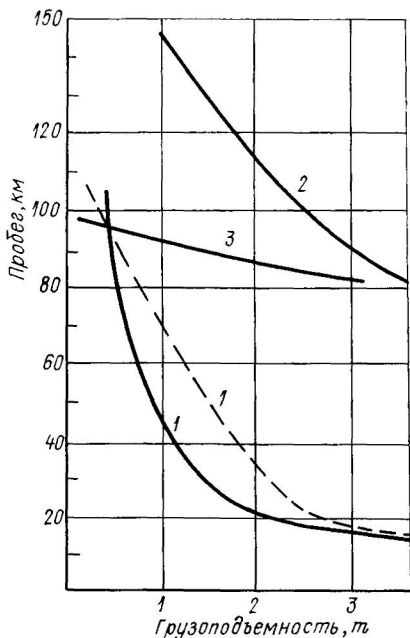
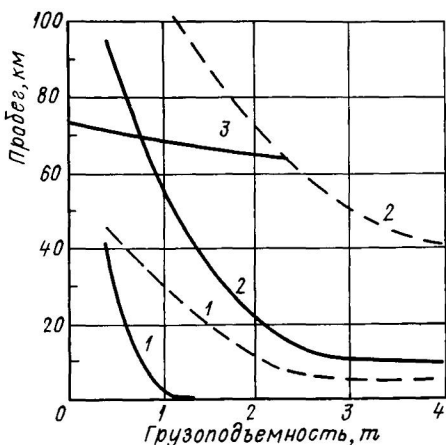


Рис. 6.1. Граница области эффективного использования электромобилей со свинцово-кислотными батареями аккумуляторов с учетом и без учета ущерба окружающей среде:

1 — граница области эффективного использования; 2 — то же с учетом ущерба; 3 — запас хода;
 — по утвержденной методике; - - - - по предлагаемой методике

Рис. 6.2. Граница области эффективного использования электромобилей с никель-железными аккумуляторными батареями с учетом и без учета ущерба окружающей среде:

1 — граница области эффективного использования; 2 — то же с учетом ущерба; 3 — запас хода;
 — по утвержденной методике; - - - - по предлагаемой методике

Оптимальные параметры массы и запас хода электромобилей со свинцово-кислотными батареями *

Параметр	Грузоподъемность, т	
	0,4	1,0
Масса аккумуляторной батареи, кг	320	321
Отношение массы батареи к расчетной массе электромобиля	0,235	0,154
Оптимальный запас хода, км	40,7	28,5

* При расчетах учитывался ущерб от отработавших газов ДВС.

для электромобилей с никель-железными аккумуляторными батареями (без учета ущерба от токсичных выбросов автомобильных ДВС)

$$L = 11,87 + 20,0 q.$$

Таким образом, выполненные расчеты показывают, что учет ущерба, причиняемого отработавшими газами автомобилей, расширяет область эффективного использования электромобилей.

Полученные зависимости позволяют определять параметры проектируемых электромобилей и область их эффективного использования с учетом снижения экономического ущерба от отработавших газов автомобильных ДВС.

Так, в настоящее время в СССР не производятся автомобили грузоподъемностью 1,5 т, что наносит народному хозяйству серьезный экономический ущерб, так как в этом случае грузы партионностью 1,5—1,6 т приходится разбивать и перевозить на автомобилях грузоподъемностью 0,8—1,0 т. Перевозки таких грузов на автомобилях грузоподъемностью 2,5 т и более также неэкономичны. Частично для перевозок этих грузов могут быть использованы электромобили. В связи с этим на основе полученных зависимостей определены параметры, которыми смогут обладать электромобили грузоподъемностью 1,5 т, а также область их эффективного использования. Для электромобилей с никель-железными аккумуляторами масса батареи 0,33 т, масса электромобиля 1,973 т, отношение массы батареи к расчетной массе 12,3 %, граница области эффективного использования электромобилей 31 км. Если принять во внимание ущерб от отработавших газов ДВС, то граница области эффективного использования таких электромобилей превышает запас хода.

Для электромобилей со свинцово-кислотными аккумуляторными батареями (с учетом ущерба от токсичных выбросов) масса источника тока 0,59 т, электромобиля 2,23 т, граница области эффективного использования электромобилей 38,4 км.

Дальнейшее увеличение массы батареи аккумуляторов, и, следовательно, запаса хода делает эксплуатацию таких электромобилей экономически нецелесообразной.

6.4. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Выше было показано, что электромобиль является перспективным видом транспортного средства, актуальность использования которого диктуется экологической обстановкой, все возрастающей дефицитностью нефти, энергетическими и экономическими факторами. Однако было отмечено, что имеется еще ряд нерешенных проблем, сдерживающих развитие и применение данного вида транспортного средства. Каждая из этих проблем, в принципе, разрешима, но требует времени и научных поисков.

Важным фактором при этом является научно-технический прогресс, курс на ускорение которого принят КПСС в качестве стратегической линии развития народного хозяйства, что нашло отражение в новой редакции Программы Коммунистической партии Советского Союза. В Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года отмечено, что одной из задач научно-технического прогресса является увеличение и улучшение структуры выпуска автомобилей, более полно отвечающих потребностям народного хозяйства и задаче экономии топлива [1].

Ранее было показано, что электромобили малой грузоподъемности уже сегодня экономически целесообразно использовать при небольших среднесуточных пробегах до 60—100 км в зависимости от применяемого источника тока. При этом, если учесть экономический ущерб, причиняемый выбросами токсичных веществ автомобильных ДВС, то область эффективного использования электромобилей заметно расширяется.

Целесообразность использования таких электромобилей в народном хозяйстве определяется следующими обстоятельствами: большинство городских перевозок состоит из коротких маршрутов, пригодных для использования электромобилей;

электромобили почти не потребляют энергию в режиме холостого хода и даже частично позволяют реализовать энергию торможения, которая обычно теряется в автомобиле с ДВС;

зарядка аккумуляторных батарей может производиться в ночное время, когда не работает большинство других потребителей электрической энергии; это способствует установлению более рационального энергетического баланса электростанций;

электромобили представляют собой нетоксичный и бесшумный вид городского транспорта;

с точки зрения охраны окружающей среды электромобиль является более рациональным видом транспорта, поскольку легче предотвратить вредные выбросы тепловых электростанций, чем отдельных автомобилей;

электромобили становятся все более перспективным видом транспорта, поскольку постоянно улучшаются удельные характеристики источников тока, тяговых двигателей и других элементов их конструкции.

Раскрывая приведенные положения, можно привести следующие данные, отмеченные в работе [38]. По мнению автора, существенным преимуществом аккумуляторных электромобилей является возможность без дополнительных капитальных вложений в электростанции увеличить выработку электрической энергии для электромобилей за счет догрузки агрегатов ТЭС в ночное время, обеспечивая тем самым наиболее экономичные режимы их работы. При этом ресурсы производства внепиковой электрической энергии обеспечиваются (в случае ее использования для электромобилей) экономией нефтяных видов топлива. Размер этой экономии превышает общую суммарную экономию нефтяных топлив за счет других перспективных мероприятий технического прогресса на автомобильном транспорте, к которым относятся расширение применения дизелей и газобаллонных автомобилей, улучшение качества шин, применение обтекателей и двигателей уменьшенной мощности, совершенствование системы питания и зажигания, уменьшение собственной массы и др.

При расчетах экономической эффективности электромобилей с учетом ущерба от токсичных выбросов автомобильных ДВС авторами не принимается во внимание ущерб, причиняемый электромобилями косвенно, т. е. за счет выбросов тепловых электростанций при производстве электрической энергии для электромобилей. Это обусловлено прежде всего тем, что основной ущерб, причиняемый загрязнением атмосферного воздуха, определяется повышенной заболеваемостью людей. Однако ТЭС, как правило, строятся за пределами города и оборудуются современными устройствами, понижающими выброс вредных компонентов. Кроме того, генеральным направлением в энергетике СССР является увеличение доли атомных электростанций. Так, в Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года поставлена задача «довести в 1990 г. выработку электроэнергии до 1840—1880 млрд. кВт·ч, в том числе на атомных электростанциях до 390 млрд. кВт·ч.» [1].

Расчеты эффективности с учетом ущерба электромобилей за счет выбросов электростанций, приведенные в работе [38], показали, что ущерб в случае замены автомобилей электромобилями уменьшается в семь-восемь раз. Все это говорит о том, что составляющей ущерба электромобилей от выбросов тепловых электростанций можно пренебречь.

Попутно следует отметить, что остаются неучтенными выбросы вредных веществ при получении автомобильных топлив из нефти, в то время как нефтеперерабатывающая промышленность является самым крупным загрязнителем атмосферы углеводородами. Это косвенно повышает эффективность использования электромобилей.

Выполненные расчеты показывают, что доля электромобилей на современных источниках тока с эффективными параметрами может достичь 40 % от автомобилей небольшой грузоподъемности. Это составит 80—100 тыс. ед. электромобилей. Чтобы создать такой парк даже при годовом объеме производства 10 тыс. ед., потребуется от 8 до 10 лет. За этот срок электромобили, произведенные в первые годы, устареют морально и физически, так как будут модернизированы их основные узлы и агрегаты, усовершенствованы базовые химические источники тока, а также созданы новые, более современные. Это неизбежно в условиях ускорения научнотехнического прогресса. Опытная эксплуатация позволит выявить и уточнить сферу их экономически целесообразного применения. Уже сегодня очевидно, что электромобили на современных ХИТ необходимо создавать узкоспециализированными для определенного вида городских перевозок. В этом случае они будут экономически целесообразны. Именно такие результаты были получены при расчетах области эффективного использования электромобилей по действующей и предлагаемой методикам оценки экономической эффективности новой техники.

Эти выводы подтверждает практика использования электромобилей, например, в Великобритании.

Выше было показано, что характеристики электромобилей, созданных в нашей стране в последние годы, несколько уступают аналогичным зарубежным образцам. Это является фактором, сдерживающим развитие электромобилей в СССР.

Анализ конструктивных характеристик электромобилей показывает, что приемлемые результаты для грузовых электромобилей могут быть получены при достижимом в настоящее время уровне удельной энергоемкости аккумуляторных батарей 35—40 Вт·ч/кг. Это относится прежде всего к размещению по объему и массе необходимой батареи, получаемой полезной нагрузке и запасу хода в городском режиме работы. Однако достижению экономической эффективности и конкурентоспособности таких электромобилей препятствует ряд показателей как самих электромобилей, так и тяговых систем. К числу их относятся: низкая надежность тяговых батарей и высокая трудоемкость их обслуживания; совершенно недостаточная долговечность (срок службы) тяговых батарей; чрезмерно высокая стоимость батарей, электродвигателей и других агрегатов и узлов тяговых систем; многотипность выпускаемых электромобилей; следствием этого является низкая серийность и высокая стоимость производства.

Названные наиболее существенные недостатки известны, и по их устранению ведется интенсивная работа практически во всех промышленно развитых странах. Можно ожидать, что при достижении приводимых далее характеристик названные проблемы перестанут являться сдерживающими. Характеристики, достижение которых необходимо для создания серийноспособного малотоннажного электромобиля, сводятся к следующим показателям:

наработка на отказ по тяговой батарее в целом — 100—200 циклов; средний ресурс батареи — не менее 1000 циклов; начальная стоимость батареи — около 0,6 стоимости экипажной части; начальная стоимость электропривода — около 0,4 стоимости экипажной части; в свою очередь стоимость экипажной части — не выше 0,8 полной стоимости автомобиля той же грузоподъемности; трудоемкость обслуживания электромобилей в целом — не выше 1,2 по отношению к автомобилям-аналогам.

Что касается разнотипности и низкой серийности грузовых электромобилей, то представляется целесообразным для условий нашей страны, а также для некоторых зарубежных стран выделение базового типа грузового электромобиля и концентрация разработок в направлении его создания. Опыт предыдущих разработок показывает, что наиболее высокими потребительскими качествами может обладать электромобиль с полезной нагрузкой 900—1000 кг, батареей примерно той же массы и полной массой около 3000 кг, производство которого опирается на широкую унификацию по узлам и агрегатам с базовым автомобилем того же класса. Можно предположить также, что электромобиль такого типа будет первоначально спроектирован в составе базового семейства автомобилей и освоен производством на заводе-производителе этих автомобилей. При этом имеется в виду, что конструктивные отличия, необходимые для электромобиля, будут предусмотрены в конструкции базового автомобиля, хотя теоретически это означает некоторое усложнение базовой конструкции. В частности, конструкция несущей рамы автомобиля должна иметь возможность установки без переделок тяговой батареи и электропривода. Это же относится к возможности установки электродвигателя, использованию узлов трансмиссии и т. д.

Совершенствование тягового электропривода направлено также на повышение надежности его работы, снижение начальной стоимости и трудоемкости обслуживания. Основным типом электродвигателя, по-видимому, останется двигатель постоянного тока с независимым возбуждением, однако упрощенной и удешевленной конструкции, создание которой, возможно, будет осуществляться за счет некоторого увеличения массы по сравнению с предельно достижимой в настоящее время. Можно также предположить, что импульсный силовой преобразователь для питания двигателя сохранится; причем стоимость его будет существенно снижена, во-первых, за счет упрощения схемы, во-вторых, путем удешевления силовых полупроводниковых приборов и, в-третьих, — за счет перехода к цифровому управлению на основе микропроцессорных БИС. Этот переход позволит резко поднять надежность и упростить обслуживание системы управления электромобилем.

Несколько более сложными являются перспективы создания электромобилей-микроавтобусов как городских маршрутных такси и грузовых электромобилей особо малой грузоподъемности. Заметим, что компоновочные возможности этих электромобилей для

размещения аккумуляторных батарей более ограничены. В связи с этим прогресс в области создания таких машин, кроме всех перечисленных ранее трудностей, связан с необходимостью повышения удельных показателей тяговых батарей. В частности, удельная энергоемкость необходима на уровне 40—50 Вт·ч/кг.

Что касается тягового электропривода, то развитие его для этих типов машин будет происходить по тем же ранее рассмотренным направлениям, что и для грузовых электромобилей.

Наиболее сложными являлись вопросы создания внутригородского легкового электромобиля. Для этого типа машин минимально необходимым показателем тяговой батареи можно считать удельную энергоемкость 70 Вт·ч/кг. При этом еще более высокие требования будут предъявлены к надежности и трудоемкости обслуживания агрегатов тяговых систем. Исходя из этого, именно для легковых электромобилей представляют интерес возможности применения тяговых электродвигателей переменного тока и прежде всего самого простого из них — асинхронного с короткозамкнутым ротором.

Однако для применения асинхронного двигателя должны быть решены вопросы создания надежного и достаточно дешевого силового преобразователя частоты. Прогресс в этом направлении зависит от развития силовых полупроводниковых приборов: силовых транзисторов, выключаемых тиристоров, комбинированно выключаемых тиристоров, а также создания новых типов приборов.

Новые возможности по созданию приборов с малым временем включения связываются с применением полупроводниковых материалов новых типов, например, арсенида галлия и некоторых других. Следует иметь в виду, что при увеличении импульсной мощности силовых транзисторов и снижении их стоимости до уровня современных тиристоров общепромышленного применения электропривод с асинхронным двигателем может оказаться конкурентоспособным с электроприводом постоянного тока и для электромобилей других типов. Для электроприводов переменного тока перспективно создание систем переменной структуры управления, выполненных с применением микропроцессорных БИС. Значительные достижения, имеющиеся в этой области, позволяют утверждать, что в этом направлении могут быть созданы серийно выпускаемые устройства управления, обладающие высокой надежностью и приемлемым уровнем стоимости.

Большое значение для увеличения запаса хода электромобилей и области их эффективного использования будет иметь применение новых высокоэнергетических источников тока. На рис. 6.3 показан запас хода электромобилей с различными источниками тока при достигнутых ими в настоящее время энергетических параметрах.

Из рисунка следует, что некоторые из рассмотренных источников тока обеспечивают запас хода электромобилей, близкий автомобилям с ДВС. Это относится к таким ХИТ, как натрий—

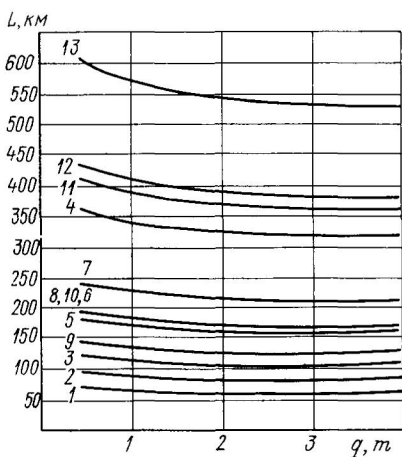


Рис. 6.3. Запас хода электромобилей с различными источниками тока:

1 — свинцово-кислотная батарея; 2 — никель-кадмевая батарея; 3 — никель-железная батарея; 4 — серебряно-цинковая батарея; 5 — никель-цинковая батарея; 6 — железо-воздушная батарея; 7 — цинк-воздушная батарея; 8 — кадмий-воздушная батарея; 9 — никель-водородная батарея; 10 — цинк — бром; 11 — цинк-хлоридная батарея; 12 — натрий-серная батарея; 13 — литий — хлор

сера, литий — хлор, цинк — хлор-гидрад, серебряно-цинковый и др.

Однако (как показали расчеты) использовать эти химические источники тока на электромобилях в настоящее время экономически нецелесообразно,

так как, во-первых, некоторые из них не вышли из стадии опытного проектирования, а во-вторых, они имеют неудовлетворительные характеристики:

1) малый срок службы аккумуляторных батарей (например, у систем кадмий—воздух, литий—хлор);

2) высокая удельная стоимость источника тока (серебряно-цинковая аккумуляторная батарея, никель—кадмий и др.).

Таким образом, электромобилям с традиционными батареями не хватает запаса хода, чтобы покрыть всю область их эффективного использования. Электромобили с перспективными химическими источниками тока будут иметь запас хода, многократно превышающий область их эффективного использования в настоящее время. Увеличение области эффективного использования электромобилей с перспективными источниками тока должно идти по пути снижения удельной стоимости батарей и повышения срока их службы.

Расчеты также показывают, что нецелесообразно применение электромобилей с новейшими источниками тока при небольших объемах производства (1—5 тыс. ед. в год). При таких объемах производства наиболее целесообразно использовать электромобили с никель-железными аккумуляторными батареями. Перспективность использования электромобилей с новыми и более энергоемкими химическими источниками тока существенно возрастает с увеличением масштабов их производства. Это обусловлено прежде всего снижением стоимости производства как самих электромобилей, так и химических источников тока.

Таким образом, развитие электромобилей неизбежно, а темпы его зависят от решения тех проблем, которые возникают на пути решения этой важной народнохозяйственной задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбачев М. С. Коренной вопрос экономической политики партии. М.: Изд-во политической лит., 1985. 32 с.
2. КПСС. Съезд (27; 1985; Москва). Материалы XXVII съезда КПСС. М.: Изд-во политической лит., 1986. С. 308, 316.
3. Аксельрод Ш. С., Гершман М. Б., Ламедман Э. М. Разработка щелочного никель-железного аккумулятора для электромобиля//Сб. работ по химическим источникам тока. Л.: Энергия, 1975. Вып. 10. С. 166—170.
4. Архангельская З. П., Флеров В. Н., Решетова Г. Н. Тенденции и перспективы развития производства и научных исследований в области никель-цинковых аккумуляторов. М.: Информэлектро, 1978. 47 с.
5. Афанасьев Л. Л., Цукерберг С. М. Автомобильные перевозки. М.: Транспорт, 1973. 320 с.
6. Багоцкий В. С., Скудин А. М. Химические источники тока. М.: Энергоиздат, 1980. 180 с.
7. Балацкий О. Ф. Экономика защиты воздушного бассейна. Харьков: Вища школа, 1976. 98 с.
8. Балашов Е. П., Григорьев В. Л., Петров Г. А. Микро- и мини-ЭВМ. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 376 с.
9. Богомазов В. А. К вопросу об оценке ущерба, наносимого отработавшими газами автомобилей с ДВС//Межвузовский сборник МВ и ССО РСФСР. Л.: ЛИЭИ, 1981. С. 196—200.
10. Бродовский В. Н., Иванов Е. С. Приводы с частотно-токовым управлением. М.: Энергия, 1975. 169 с.
11. Великанов Д. П. Применение системной связи для оценки совершенства конструкций автомобилей//Сб. трудов института комплексных транспортных проблем. М.: Транспорт, 1979. С. 128—136.
12. Волков А. А., Зимин-Компановский А. И., Волкова Т. Е. Критерий и система показателей эффективности в управлении производством//Научные основы управления производством. Л.: ЛКИ, 1974. С. 54—68.
13. Дасоян М. А., Агуф И. А. Современная теория свинцового аккумулятора. Л.: Энергия, 1975. 312 с.
14. Ипатов М. И. Технико-экономический анализ проектируемых автомобилей. М.: Машиностроение, 1982. 272 с.
15. Использование скользящих режимов в задачах управления электрическими машинами/Д. Б. Изосимович, Б. Матич, В. И. Уткин, А. Шабанович//ДАН СССР, 1978, № 4. С. 769—772.
16. Капустин А. А., Комачева А. Н., Чемоданова А. Н. Состояние исследований и основные направления НИР, опытно-конструкторских и технологических работ по серно-натриевым источникам тока за рубежом. М.: Информэлектро, 1983. 44 с.
17. Ковда В. А. Рациональное использование ресурсов биосферы. М.: Знание, 1978. 128 с.
18. Коврига В. П., Отдельнова Е. Е. Некоторые вопросы электромобильного и электробусного транспорта//Опыт эксплуатации транспортных средств с прогрессивными двигателями и охрана воздушного бассейна города. Л.: ЛДНТП, 1978. С. 59—63.
19. Козловский А. Б., Яковлев А. И. Испытательные циклы электромобиля//Автомоб. пром-сть, 1983, № 2. С. 9—12.
20. Козловский А. Б., Яковлев А. И. Метод теоретической оценки технико-эксплуатационных параметров автомобилей//Автомоб. пром-сть, 1979, № 1. С. 19—22.
21. Кравцов И. И. Полные капитальные вложения в области промышленности. М.: Наука, 1973. 132 с.
22. Краткий автомобильный справочник/А. И. Понизовский, В. С. Шуркина, И. Д. Тузовский и др. М.: Транспорт, 1984. 464 с.
23. Лавренев В. М., Центр Б. И., Гершман Н. Б. Электрохимический индикатор полной заряженности щелочных негерметичных аккумуляторов//Сб.

работ по химическим источникам тока. Л.: Энергия, 1976. Вып. 11. С. 87—92.

24. **Лурье М. И.** Исследование шумности автобусов//Городской транспорт. Экспресс-информация, 1978, № 1. С. 5—9.

25. **Лызлов Н. Ю., Даниленко И. Ф., Агуф И. А.** К теории заряда аккумуляторных электродов//Электрохимия, 1980. Т. 9. С. 1333—1338.

26. **Методика** (основные положения) определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. М.: Экономика, 1977. 44 с.

27. **Морговский Ю. Я., Березин А. В., Салахов М. Х.** Электродвигатели для электромобилей ВАЗ//Автомоб. пром-сть, 1984, № 1. С. 9—11.

28. **Морговский Ю. Я.** Импульсные системы управляемой структуры с тиристорными преобразователями. М.: Энергия, 1976. 248 с.

29. **Морговский Ю. Я., Чеховой Ю. Н.** Статистическая оптимизация автономного электропривода постоянного тока с частотно-широким импульсным управлением//Автоматика, 1980, № 1. С. 67—73.

30. **Мучник Г. Ф., Каричев З. Р., Касимов О. Г.** Транспортная энергоустановка на базе водорода-воздушных ЭХГ для электромобиля и предварительные дорожные испытания//Тезисы докл. VI Всесоюз. конф. по электрохимии. М.: МГУ, 1982. С. 117.

31. **Непорожный П. С.** Настоящее и будущее энергетики мира//Энергетика мира. М.: Энергия, 1979. С. 5—9.

32. **Прангишвили И. В., Стерцюра Г. Г.** Микропроцессорные системы. М.: Энергия, 1980. 225 с.

33. **Пролыгин А. Т.** Тяговый привод большегрузных карьерных электромобилей//Электротехника, 1977, № 7. с. 40—48.

34. **Развитие автомобильных транспортных средств**/Д. П. Великанов, В. И. Бернацкий, М. А. Боева и др. М.: Транспорт, 1984. 120 с.

35. **Смолер Н. И.** О социально-экономических последствиях воздействия шума автомобилей на городское население. М.: МАДИ, 1979. 70 с.

36. **Состояние и перспективы развития никель-железных и никель-кадмиевых тяговых аккумуляторов**/М. Б. Шапот, Б. И. Ужинов, В. Н. Константинов, В. Н. Дробышевский//Сб. работ по химическим источникам тока. Л.: Энергия. Вып. 10, 1975. С. 147—159.

37. **Сперанский С. М.** Влияние мероприятий по безопасности и ограничению эмиссии токсичных веществ на стоимость автомобилей//Автомоб. транспорт. Экспресс-информация, 1976, № 41. С. 3—5.

38. **Ставров О. А.** Перспективы создания эффективного электромобиля. М.: Наука, 1984. 28 с.

39. **Ставров О. А.** Электромобили. М.: Транспорт, 1968. 102 с.

40. **Тельковцев В. В., Ценер Б. И.** Основы теории и эксплуатации герметичного никель-кадмиевого аккумулятора. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 95 с.

41. **Теплинская Т. К., Машевич М. Н., Брустниа Б. Б.** Состояние, тенденции и перспективы научных исследований и разработок в области технологии тяговых аккумуляторов. М.: Информэлектро, 1983. 40 с.

42. **Тихомиров Н. Н.** Техничко-экономические изыскания и проектирование автотранспортных предприятий. М.: Транспорт, 1973. 226 с.

43. **Уткин В. И.** Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой. М.: Наука, 1974. 160 с.

44. **Фоменко А. Л., Белятынский А. А., Тодоренко Н. Е.** Снижение автотранспортного шума в городах. Киев: Техника, 1979. С. 22.

45. **Хачатуров Т. С.** Эффективность капитальных вложений. М.: Экономика, 1979. 366 с.

46. **Ценер Б. И., Хотяницева А. Г., Милютин Н. Н.** Инженерные проблемы создания силовой батареи на базе никель-водородных аккумуляторов//Изв. АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт, 1985, № 2. С. 145—149.

47. **Чеснин М. С.** Внимание: шум. Л.: Лениздат, 1978. С. 190.

48. **Щетина В. А., Богомазов В. А.** Влияние технико-экономических показателей электромобилей на эффективность их использования//Автомоб. пром-сть, 1980, № 1. С. 16.

49. Щетина В. А., Богомазов В. А. Методика экономического анализа области рационального использования электромобилей//Межвузовский сборник МВ и ССО РСФСР. Л.: ЛИЭИ, 1979. С. 25—28.

50. Щетина В. А., Богомазов В. А. Планирование и оптимизация объемов производства электромобилей//Межвузовский сборник МВ и ССО РСФСР. Л.: ЛИЭИ, 1982. С. 37—43.

51. Щетина В. А., Богомазов В. А. Прогнозирование запаса хода электрических автомобилей//Межвузовский сборник МВ и ССО РСФСР. Саратов: СПИ, 1979, № 4. С. 25.

52. Blasche F. Das Prinzip der Feldorientierung, die Grundlage für die Transvektor//Regelung von Drehfeldmaschinen. Siemens — Zeitschrift. 1971. Bd. 45. N 10. S. 757—760.

53. Bose B. K., Sutherland H. A. Microcomputer-Based Real Time Feedback Controller for an Electric Vehicle Drive System. Proc. 14th Annual IEEE — IAS Conference. 1979. P. 117—131.

54. Cairns E. and Hietvrinn E. Electrochemical Power for Transportation//Comprehensive Treatises of Electrochemistry. N. J. and London; Plenum Press. 1981. V. 4. P. 421—504.

55. Cairns E. Secondary batteries new batteries — high temperature//Comprehensive Treatise of Electrochemistry. N. Y. and London; Plenum Press. 1981. V. 3. P. 341—368.

56. Gibbard H. F. and Chen C. C. Thermal Management of Battery Systems for Electric Vehicles and Utility Load Leveling//Proc. 14th Intersociety Engineering. Boston. 1979. P. 725—729.

57. Gutman G. Entwicklung Ni/H₂ Akkumulatoren. Dahena Monograph. 1981. Bd. 92. S. 1885—1913.

58. Kordesch K. The electric automobile Batteries. N. J. ans Basel; Marcell Dekker JNC. 1977. V. 2. P. 201—413.

59. Plunkett A. B., Kliman G. B. Electric vehicle AC drive development//SAE Technical Paper Series. 1980. P. 3—37.

60. Weisman E. Lead-Acid Batteries. N. Y. and Basel; Marcell Dekker JNC. 1977. V. 2. P. 5—181.

61. Wilson J. W. A. The Drive System of the Near-Term Electric Vehicle (ETV-1)//SAE Technical Paper Series. 1980. V. 2. P. 5—181.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие	3
Введение	5
Глава 1. Предпосылки и тенденции развития электромобилей	9
1.1. Этапы развития электромобилей и их конструкции	—
1.2. Особенности конструкции электромобилей	15
1.3. Техничко-эксплуатационные показатели электромобилей	28
Глава 2. Химические источники энергии для электромобилей	38
2.1. Принцип работы и требования к электрическим батареям для электромобилей	—
2.2. Анализ промышленных типов электрических аккумуляторов	44
2.3. О возможности применения топливных элементов и комбинированных аккумуляторов в электромобилях	65
2.4. Эксплуатационные особенности использования аккумуляторных батарей	74
Глава 3. Тяговые системы электромобилей	81
3.1. Развитие электроприводов электромобилей	—
3.2. Основные типы тяговых электроприводов электромобилей	88
3.3. Выбор конструктивных вариантов исполнения агрегатов электропривода	106
3.4. Анализ энергетических режимов тяговых систем электромобилей	113
3.5. Статическая и динамическая оптимизация тяговой системы электромобиля	122
3.6. Развитие систем управления тяговыми электроприводами	130
3.7. Эксплуатационные характеристики тяговых систем	138
Глава 4. Влияние конструктивных параметров на эффективность электромобилей	147
4.1. Критерий и показатели эффективности автомобильных транспортных средств	—
4.2. Производительность электромобилей	153
Факторы, влияющие на производительность электромобилей	—
Оптимизация конструктивных параметров электромобилей по критерию производительность	169
4.3. Себестоимость перевозок	171
4.4. Выбор и оптимизация конструктивных параметров по критерию минимума приведенных затрат	177
Глава 5. Область эффективного использования электромобилей . . .	181
5.1. Методика расчета области эффективного использования электромобилей	—
Общие положения	—
Экономико-математическая модель сравнения эффективности автомобилей с ДВС и электромобилей	182
Методика и расчет приведенных затрат на производство транспортных средств	184
Затраты в сфере эксплуатации транспортных средств	187
Сферы применения и масштабы производства электромобилей	192
Производительность транспортных средств	196

Расчет экономического эффекта от использования электромобилей	196
Особенности расчета эффективности электромобилей по предлагаемой методике	—
5.2. Анализ области эффективного использования аккумуляторных электромобилей	199
5.3. Исследование влияния конструктивных параметров и технико-экономических показателей на эффективность электромобилей	205
5.4. Область эффективного использования электромобилей с топливными элементами и комбинированными энергосиловыми установками	215
Электромобили с топливными элементами	—
Область эффективного использования электромобилей с комбинированными энергосиловыми установками	218
5.5. Оценка экономической эффективности электробусов и легковых электромобилей-такси	222
Глава 6. Учет социально-экологических факторов при оценке эффективности электромобилей	224
6.1. Анализ социально-экологических факторов и их влияния на развитие транспортных средств	—
6.2. Методические подходы к оценке ущерба, наносимого токсичными выбросами автомобильного транспорта	234
6.3. Оценка области эффективного использования электромобилей с учетом экологической составляющей	239
6.4. Перспективы развития электромобилей	243
Список литературы	249