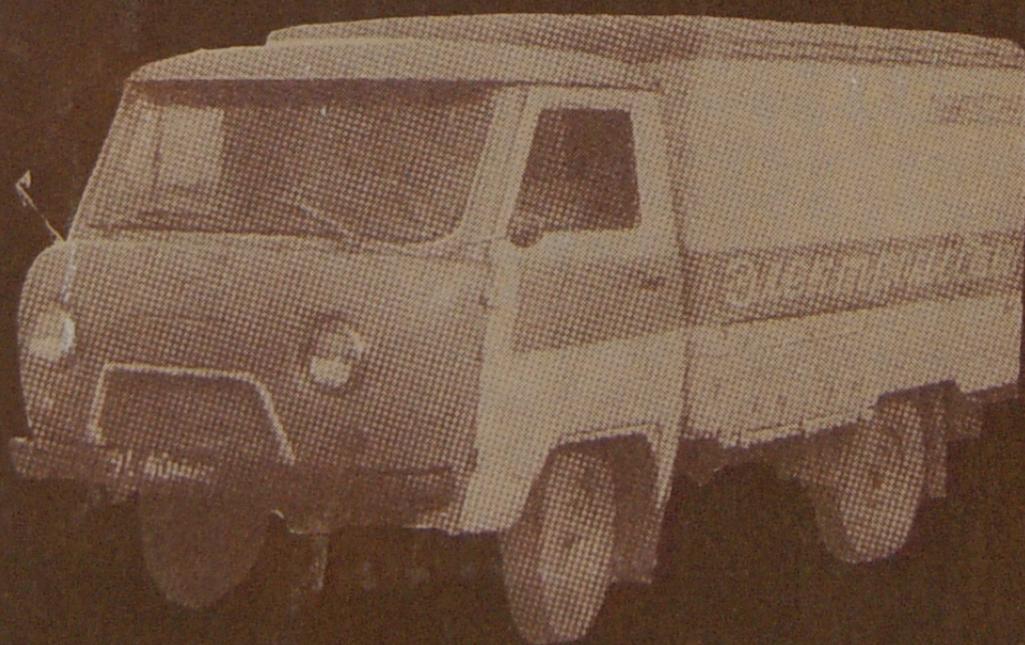
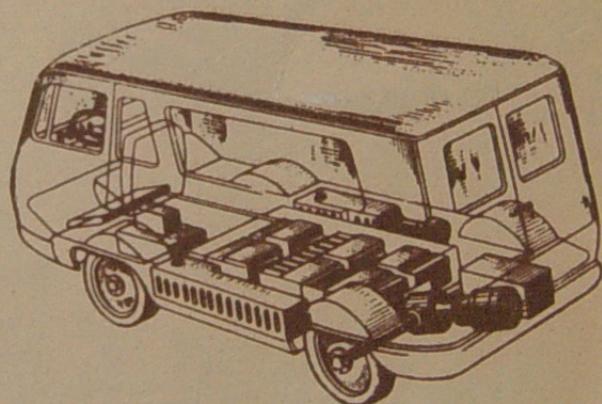
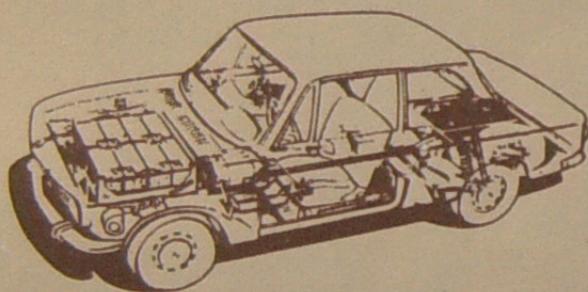


835.725

А. Ставров

# ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ



629.113

с 76

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО КОМПЛЕКСНЫМ ПРОБЛЕМАМ  
ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ  
И ТРАНСПОРТНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

ГОСПЛАН СССР

ИНСТИТУТ КОМПЛЕКСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОБЛЕМ

О.А. Ставров

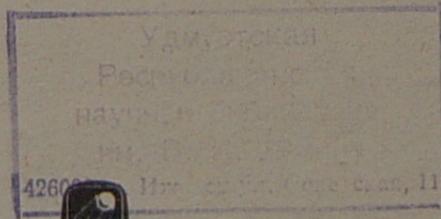
ПЕРСПЕКТИВЫ  
СОЗДАНИЯ  
ЭФФЕКТИВНОГО  
ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

4 835725  
98 76

Ответственный редактор

член-корреспондент АН СССР

Д.П. ВЕЛИКАНОВ



~~70~~ set X

ИЗДАТЕЛЬСТВО "НАУКА"

Москва 1984

672-111

Ставров О.А. **Перспективы создания эффективного электромобиля.** — М.: Наука, 1984.

Дается анализ энергетических и экологических преимуществ различных типов электромобилей. Рассматриваются основные свойства и характеристики электромобилей с различными типами источников энергии. Показана возможность путем оптимизации основных параметров создать эффективные электромобили на базе современных типов аккумуляторов.

Для специалистов в области конструирования электромобилей. Табл. 21. Ил. 48. Библ. 18 назв.

Рецензенты:

канд. техн. наук *Р.П. Лахно*,  
канд. техн. наук *Б.М. Нифонтов*

## ВВЕДЕНИЕ

Принятые XXVI съездом КПСС "Основные направления экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года" предусматривают: "Обеспечить создание и начать производство малотоннажных грузовых электромобилей с эффективными источниками тока для внутригородских перевозок".

Столь большое внимание, уделяемое развитию производства электромобилей, обусловлено тем, что вследствие широкого их применения уменьшается потребность страны в светлых нефтепродуктах и окружающая среда предохраняется от загрязнений автотранспортом. Необходимость решения указанных проблем приобретает в последние годы все большее народнохозяйственное значение.

Основным недостатком электромобиля является ограниченный запас хода, для увеличения которого необходимы гораздо более энергоемкие химические источники тока.

В последние годы выявляется возможность создания и применения на электромобилях источников энергии, имеющих в несколько раз большую энергоемкость, чем у существующих аккумуляторов. Поэтому работами над электромобилями начинает заниматься все большее количество научно-исследовательских организаций и лабораторий крупнейших зарубежных фирм во многих странах. В Советском Союзе работы по электромобилям ведутся как в НИИ и КБ, так и на ряде заводов.

Однако многие из созданных в последние годы образцов электромобилей как в СССР, так и за рубежом обладают неудовлетворительными технико-экономическими параметрами, и их применение экономически нецелесообразно. Очевидно, что использование более энергоемких источников энергии позволит увеличить запас хода электромобилей, но если они при этом экономически останутся неэффективными, то широкого практического применения такие транспортные средства не найдут.

Поэтому с особой остротой встал вопрос о возможности создания эффективных электромобилей как на базе существующих аккумуляторов, так и с использованием перспективных химических источников тока. Однако если в области исследований эффективности автомобилей с двигателями внутреннего сгорания существует целое научное направление, созданное трудами чл.-корр. АН СССР Д.П. Великанова, д.т.н. Л.А. Афанасьева, д.т.н. Л.А. Бронштейна, д.э.н. М.И. Ипатова и других, то вопросам эффективности электромобилей до сих пор уделялось недостаточное внимание и известные методы определения основных параметров и оценки эффективности электромобилей имеют существенные недостатки и требуют серьезного уточнения.

В данной работе представлены методы и основные результаты теоретических технико-экономических исследований перспектив создания эффективного электромобиля. Книга содержит комплексное изложение основных вопросов, связанных с созданием и применением электромобилей в народном хозяйстве.

© Издательство "Наука", 1984 г.

3603030000-511  
С 042 (02)-84 309-84-IV

ГЛАВА 1

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ  
И ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ В НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ  
И ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Под термином "электромобиль" имеется в виду автомобиль, у которого вся или часть энергии для работы тягового привода создается химическим источником тока — аккумуляторной батареей или батареей топливных элементов. Это определение охватывает, помимо чисто аккумуляторных электромобилей, также автотранспортные средства с комбинированными энергетическими установками, состоящими из двух (или более) источников энергии, из которых один обязательно является электрохимическим источником тока (например, аккумулятор + двигатель-генератор, аккумулятор + турбогенератор и т.д.).

Основные эксплуатационные и технические параметры электромобиля в первую очередь определяются типом применяемой энергосиловой установки. Поэтому в основу классификации электромобилей положено подразделение их на три основных типа по виду источника энергии.

Поскольку электромобиль представляет собой всего лишь разновидность автомобильных транспортных средств, то классификация электромобилей аналогична транспортной классификации автомобилей, разработанной в ИКТП чл.-корр. АН СССР Д.П. Великановым [1].

Следует отметить, что классификация электромобилей по размерности имеет ряд отличий по сравнению с классификацией автомобилей: градация легковых и специальных электромобилей дается по снаряженной массе, а не по сухой; градация размерности грузовых электромобилей ограничивается большой грузоподъемностью, так как электромобилей особо большой грузоподъемности в настоящее время еще нет.

В соответствии с разработанной классификацией ниже дан анализ электромобилей по типу источника энергии: аккумуляторных, с электрохимическими генераторами и с комбинированными установками.

**Аккумуляторные электромобили.** Они являются давно известными и единственными, находящими практическое применение [2—5]. Однако использование их до сих пор весьма ограничено. Наиболее широко электромобили применяются в Англии, где численность их парка составляет около 30 тыс. шт.

Столь незначительное использование аккумуляторных электромобилей объясняется наличием у них существенного недостатка — ограниченного запаса хода. Следует иметь в виду, что понятие "ограниченный запас хода" нельзя понимать буквально, как невозможность обеспечить на аккумуляторах с ограниченной энергоемкостью довольно значительных величин пробега электромобиля. Так, например, на рис. 1 показаны возможные значения среднеэксплуатационного запаса хода электромобиля грузоподъемностью 400 кг (250 кг + 2 чел.) на современных никель-железных аккумуляторах, имеющих удельную энергоемкость 37 Вт · ч/кг, в режиме пятичасового разряда.

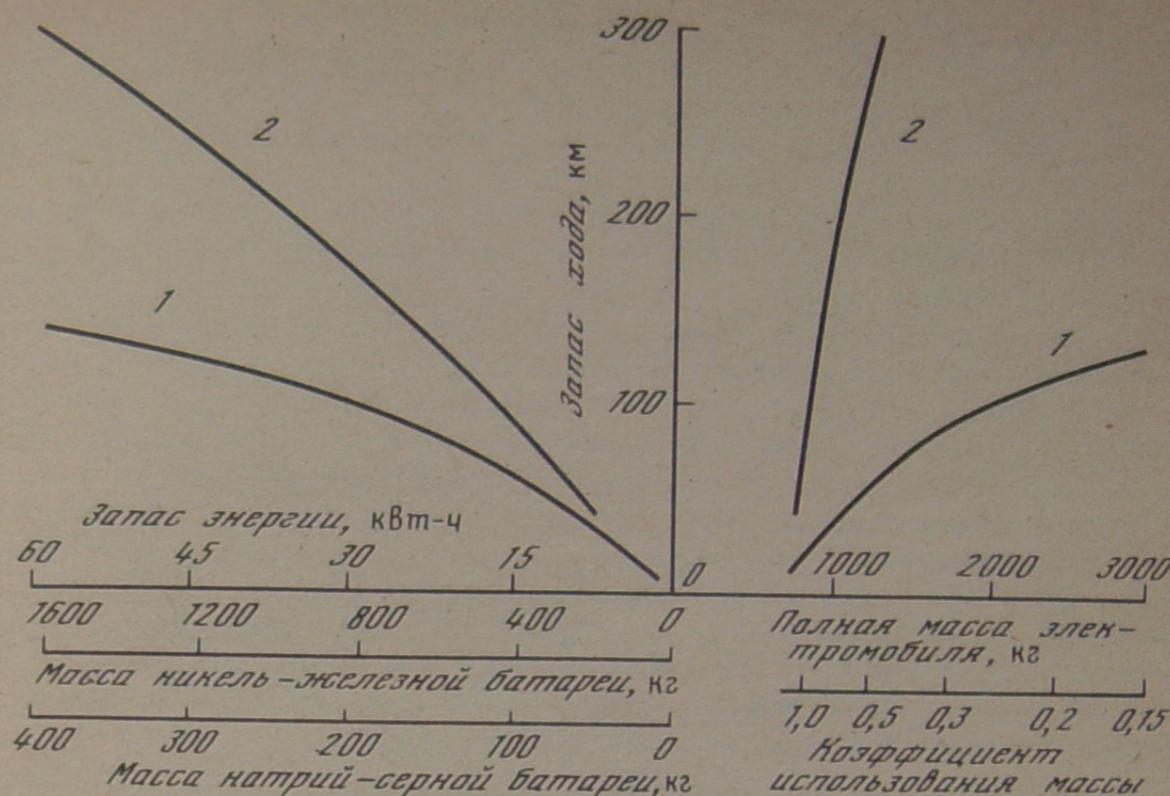


Рис. 1. Возможные параметры аккумуляторного электромобиля грузоподъемностью 400 кг. (2 чел. + 250 кг)  
1 — с никель-железными аккумуляторами; 2 — с натрий-серными аккумуляторами

Как видно из графика, на современных аккумуляторах технически возможно создание электромобилей с эксплуатационным запасом хода 120 км и более, что является достаточным для обслуживания значительной части автомобильных перевозок в крупных городах. Однако, как следует из того же графика, электромобиль грузоподъемностью 400 кг с запасом хода 120 км на современных аккумуляторах должен иметь полную массу около 2500 кг. Последнее обуславливает высокую стоимость электромобиля и повышенные эксплуатационные затраты.

Величина запаса хода может быть существенно увеличена за счет применения более энергоемких аккумуляторов или за счет специальной конструкции электромобиля.

Как видно из рис. 1, применение более энергоемких аккумуляторов, естественно, позволяет значительно уменьшить полную массу электромобиля при одинаковом запасе хода. Однако и в этом случае обеспечение значений запаса хода, характерных для современных автомобилей (300—400 км), может быть только при значительной массе батареи и полной массе электромобиля, заметно превышающей полную массу однотипного автомобиля.

Конструктивное ограничение запаса хода тем более существенно, что электромобиль не может так же быстро, как автомобиль, заправляться топливом, осуществлять зарядку аккумуляторной батареи: чтобы полностью зарядить разряженные аккумуляторы, обычно требуется около 9—10 ч.

В настоящее время разрабатываются методы ускоренного подзаряда аккумуляторных батарей, которые позволяют за 1 ч увеличить емкость разряженной батареи до 80%. При этом пока что окончательно не установлено влияние ускоренных зарядов на срок службы аккумуляторов. Однако если ускоренная зарядка и не будет оказывать вредного воздействия на

срок службы, все же осуществление в процессе эксплуатации регулярных подзарядов в течение часа и более возможно только на отдельных маршрутах, где по технологии перевозок имеются длительные простои транспортного средства в заранее известных местах, которые могут быть оборудованы подзарядными пунктами.

В настоящее время также исследуется возможность быстрого и эффективного возобновления запаса хода электромобиля путем смены его аккумуляторных батарей в течение рабочего дня. Большинство электромобилей, созданных в последнее время, имеют конструкцию, обеспечивающую возможность быстрой смены аккумуляторов. Одновременно ведутся работы по созданию станций по замене аккумуляторных батарей электромобилей [5]. Однако за счет использования смены батарей в течение рабочего дня обеспечить широкое применение электромобилей на существующих типах аккумуляторных батарей невозможно по следующим соображениям: экономическим (значительные затраты на строительство станций, неизбежные непроизводительные пробеги, высокая стоимость материалов, применяемых для современных аккумуляторов, необходимость дополнительного обслуживающего персонала); организационным (создание необходимого количества станций); социальным (строительство станций в сложившихся районах, необходимость зон отчуждения).

Очевидно также, что в перспективе по мере увеличения запаса хода электромобилей значение смены аккумуляторов в течение рабочего дня будет уменьшаться. Поэтому замену и подзарядку аккумуляторной батареи электромобилей следует рассматривать как дополнительные мероприятия, обеспечивающие возможность применения электромобилей с ограниченным запасом хода на ряде отдельных видов перевозок и маршрутов, позволяющих осуществлять эти мероприятия без ущерба экономике.

Таким образом, ограничение по технико-экономическим соображениям запаса хода аккумуляторных электромобилей является основным фактором, определяющим возможности их практического применения: в большинстве случаев аккумуляторные электромобили будут использоваться (как и в настоящее время) на тех маршрутах и видах перевозок, где суточный пробег (по технологии перевозок) не превышает запаса хода электромобиля.

Электромобили с электрохимическими генераторами (топливными элементами). Пока что во всем мире создано всего лишь несколько опытных образцов таких машин. Объясняется это тем, что в настоящее время наибольшие успехи, приведшие к созданию практически работоспособных агрегатов, достигнуты в области водородно-кислородных (воздушных) топливных элементов со щелочным электролитом.

В связи с потенциальной взрывоопасностью, неудобством хранения и транспортирования, отсутствием дешевых источников получения водорода не из органических топлив еще в начале 1970 г. возможность применения на автомобилях водородно-воздушных топливных элементов категорически отвергалась [6]. Однако быстрый рост цен на нефть изменил положение: серьезно стала обсуждаться возможность широкого применения водорода в энергетике и на транспорте. При этом справедливо указывается, что заметное использование водорода в энергетике может быть только после 1995—2000 годов. Поэтому и перспективы использования электромобилей с электрохимическими генераторами весьма отдаленные и их сравнение необходимо проводить с автомобилем, работающим с водородным двигателем внутреннего сгорания.

Основным преимуществом электромобилей на водородно-воздушных топливных элементах, обуславливающим их перспективность по сравне-

| Система подзарядки по типу двигателя или источника энергии |   | Буферный источник энергии      |                  |                           |         |                   |
|--|---|--------------------------------|------------------|---------------------------|---------|-------------------|
|  |   | Электрохимические аккумуляторы |                  | Механические аккумуляторы |         | Термоаккумуляторы |
|  |   | Свинцово-кислотные             | Никель-кадмиевые | Маховик                   | Пружина |                   |
| Тепловые двигатели   | Бензиновые ДВС с шатунно-поршневым механизмом | ○                              | ○                | ○                         | △       | —                 |
|  | Дизель с шатунно-поршневым механизмом         | ○                              | △                | △                         | —       | —                 |
|  | Газовый ДВС с шатунно-поршневым механизмом    | ○                              | —                | —                         | —       | —                 |
|  | Роторно-поршневой двигатель (типа Ванкеля)    | ○                              | △                | —                         | —       | —                 |
|  | Газотурбинный двигатель                       | —                              | —                | △                         | —       | —                 |
|  | Двигатель внешнего сгорания типа Стирлинга    | ○                              | —                | —                         | —       | △                 |
| Химические источники тока                                  | Свинцово-кислотные аккумуляторные батареи     | ▨                              | ○                | —                         | —       | —                 |
|  | Воздушно-цинковые аккумуляторные батареи      | ○                              | △                | —                         | —       | —                 |
|  | Литий-фтористые аккумуляторные батареи        | —                              | ○                | —                         | —       | —                 |
|  | Водородно-кислородные топливные элементы      | ○                              | △                | —                         | —       | —                 |
|  | Гидразино-воздушные топливные элементы        | △                              | △                | —                         | —       | —                 |
| Термоионные преобразователи                                |   | △                              | —                | —                         | —       | —                 |
| Контактная сеть  |   | ○                              | △                | ○                         | —       | —                 |

Обозначения:

- системы, по которым нет сведений;
- △ системы, которые лишь обсуждаются;
- системы, по которым созданы отдельные опытные образцы;
- системы, по которым созданы опытные образцы, проходящие эксплуатационные испытания;
- ▨ область электромобилей с комбинированным питанием;
- ▨ чистые электромобили

Рис. 2. Классификация систем комбинированного питания

нию с автомобилями с водородным двигателем внутреннего сгорания, является их гораздо больший КПД (до 60—70%), а также их практически полная безвредность, в то время как в отработавших газах двигателя внутреннего сгорания, работающего на водородно-воздушной топливной смеси, присутствуют, практически в таких же размерах, как и у современных бензиновых двигателей и дизелей, токсичные окислы азота.

Большим преимуществом топливных элементов перед существующими аккумуляторами является то, что они могут работать сколько угодно долго, если будет обеспечен непрерывный подвод реагентов и отвод продуктов реакции. Это обеспечивает высокие значения удельной энергоемкости при длительной работе и практически снимает ограничение по запасу хода, свойственное для аккумуляторных электромобилей. Поэтому перспективы практического применения электромобилей на топливных элементах будут обуславливаться только их технико-экономической эффективностью в период широкого применения водорода в народном хозяйстве.

Электромобили с комбинированной энергосиловой установкой. Идея этих электромобилей заключается в значительном уменьшении потреб-

ной энергоемкости (и, следовательно, массы) аккумуляторной батареи за счет ее подзарядки от дополнительного энергоагрегата, обладающего высокой удельной энергоемкостью.

На рис. 2 приведена классификация возможных систем комбинирования энергосиловых установок для автомобилей. Среди них выделена область электромобилей.

Как видно из рисунка, наиболее широко исследуются системы, в которых для подзарядки используются двигатель-генераторные установки на основе двигателей внутреннего сгорания, электрохимические генераторы и контактная сеть.

При рассмотрении электромобилей с комбинированным питанием следует иметь в виду не только разнообразие возможных сочетаний типов двигателей и источников энергии с различными типами электрохимических аккумуляторов, но и различное структурное построение комбинированных энергосиловых установок, что предопределяет и отличительные свойства электромобилей. Однако в общем случае решающим следует считать отношение энергии, отдаваемое в процессе работы подзарядным агрегатом, к емкости по энергии аккумуляторной батареи: при малом отношении запас хода является ограниченным, при большом он может определяться только запасом топлива (энергии) подзарядного агрегата.

## 1.2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Быстрый рост цен на нефть и нефтепродукты на мировом рынке (табл. 1) сделал эти продукты весьма эффективным товаром, обеспечивающим получение необходимых для страны валютных поступлений. Указанное обстоятельство является существенным дополнительным фактором, обуславливающим необходимость экономии нефти и нефтяных видов топлива.

Во всех промышленно развитых странах мира автомобильный транспорт является одним из основных потребителей наиболее массовых нефтяных видов топлива — бензина и дизельного топлива (табл. 2). Поэтому мероприятия, обеспечивающие замену нефтяных видов топлив на автомобильном транспорте, имеют особую актуальность.

Именно возможность с применением электромобилей уменьшить потребность автомобильного транспорта в нефтяных видах топлива является их важнейшим принципиальным энергетическим преимуществом. Взамен нефтяных топлив для аккумуляторных электромобилей требуется электрическая энергия, количество которой, очевидно, должно быть пропорционально высвобождаемому количеству бензина или дизельного топлива.

При условии, что полезная работа (т. е. необходимая энергия на само передвижение) в случае однотипных машин одинакова, расход энергии

Таблица 1

Изменение мировых цен на нефть и нефтепродукты (в % к 1967 г.)

| Сырье, продукты   | 1967 г. | 1970 г. | 1973 г. | 1976 г. | 1979 г. | 1982 г. |
|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Нефть             | 100     | 100     | 182     | 685     | 754     | 760     |
| Бензин            | 100     | 103     | 180     | 256     | 321     | 625     |
| Дизельное топливо | 100     | 116     | 224     | 302     | 536     | 745     |

автомобилем ( $\mathcal{E}_a$ ) и электромобилем ( $\mathcal{E}_э$ ) связан зависимостью

$$\mathcal{E}_э = \mathcal{E}_a (\eta_a / \eta_э), \quad (1.1)$$

где  $\eta_a, \eta_э$  — соответственно КПД автомобиля и электромобиля.

Подставляя в уравнение (1.1) общепринятые размерности расхода энергии для автомобиля

(расход топлива в кг) и аккумуляторного электромобиля (расход электроэнергии в кВт · ч) с соответствующими переводными коэффициентами, получаем, что теоретически взамен каждого сэкономленного килограмма бензина (10500 ккал  $\approx$  43,9 МДж) для электромобилей требуется около 4,8 кВт · ч (17,3 МДж) электрической энергии, а взамен каждого килограмма дизельного топлива (10400 ккал  $\approx$  43,5 МДж) — около 6,7 кВт · ч (24,0 МДж).

Полученные значения являются весьма условными, и их следует рассматривать как первое приближение и предварительную оценку. Определяется это прежде всего тем, что в условиях реальной эксплуатации КПД энергосиловых установок значительно отличается от номинальных значений, которые использованы при расчете энергетических балансов. Так, например, КПД автомобильных бензиновых двигателей по данным испытаний составляет в условиях эксплуатации всего лишь около 12%, что в 2 раза меньше номинального значения. Укажем также, что условие равенства полезной работы автомобиля и электромобиля не учитывает различия их полной массы при одинаковой грузоподъемности.

Указанные и другие факторы, также действующие в разные стороны, и определяют условность полученных соотношений и целесообразность их уточнения путем анализа фактических данных по существующим автомобилям и электромобилям. Такие данные по расходу энергии известных образцов электромобилей и однотипных автомобилей приведены в табл. 3.

Как видно из таблицы, с учетом реальных условий эксплуатации соотношение расхода электрической энергии электромобилем и бензина автомобилем является для первого еще более благоприятным: взамен каждого килограмма бензина (43,9 МДж) требуется всего лишь около 3,8 кВт · ч (т. е. около 13,6 МДж) электрической энергии.

Полученные данные по расходу энергии позволяют сделать вывод, что при замене автомобилей с двигателями внутреннего сгорания на аккумуляторные электромобили потребность автомобильного транспорта в энергии уменьшается при расчете по номинальным значениям КПД в 2,5 раза в сравнении с бензином или в 1,8 раза в сравнении с дизельным топливом. При сравнении имеющихся образцов электромобилей с однотипными автомобилями с бензиновым двигателем потребность в энергии получается еще меньше (в 3,2 раза).

Однако при таком сравнении следует иметь в виду, что для автомобилей и электромобилей используются различные виды энергии (нефтяные топлива и электрическая энергия), которые являются или продуктами переработки первичных энергоресурсов, или результатом их использования для получения электрической энергии. Поэтому с народнохозяйственной точки зрения энергетическая эффективность транспортных средств, использующих различные виды энергии, должна оцениваться коэффициентом полезного использования первичных энергоресурсов [7], который представляет собой долю полезного использования энергоресурсов и учитывает

Таблица 2

Удельный вес автомобильного транспорта в потреблении нефти и нефтепродуктов (в %)

| Страна | Бензин | Дизельное топливо |
|--------|--------|-------------------|
| США    | 97,8   | 27,7              |
| ФРГ    | 99,2   | 71,8              |
| Япония | 97,1   | 72,3              |

Таблица 3  
Расход энергии электромобилями и автомобилями

| Модель электромобиля (страна) | Грузоподъемность | Фактический расход энергии электромобилем в условиях городского движения, кВт·ч/100 км | Расход бензина однотипным автомобилем, л/100 км (кг/100 км) | Соотношение расхода электроэнергии (кВт·ч) и бензина (кг) |
|-------------------------------|------------------|--|---|---|
| ВАЗ (СССР)                    | 200 кг + 2 чел.  | 21,2   | 11,0 (8,0)  | 2,7   |
| Харбилт (Англия)              | 200 кг + 2 чел.  | 33,0   | 11,0 (8,0)  | 4,1   |
| Тойо-Когико (Япония)          | 300 кг + 2 чел.  | 26,0   | 11,0 (8,0)  | 3,3   |
| Дорниер (ФРГ)                 | 300 кг           | 20,0   | 8,0 (5,8)   | 3,5   |
| Коппер (США)                  | 454 кг + 2 чел.  | 32,0   | 11,0 (8,0)  | 4,0   |
| Лукас (Англия)                | 700 кг + 2 чел.  | 42,5   | 16,0 (11,6)   | 3,7   |
| Фольксваген (ФРГ)             | 800 кг           | 43,5   | 16,0 (11,6)   | 3,7   |
| ЕрАЗ (СССР)                   | 900 кг           | 52,0   | 17,0 (12,3)   | 4,2   |
| МВВ (ФРГ)                     | 900 кг           | 43,0   | 17,0 (12,3)   | 3,5   |
| НАМИ (СССР)                   | 1000 кг + 2 чел. | 41,2   | 17,0 (12,3)   | 3,4   |
|                               |                  | Среднее соотношение по всем моделям  |   | 3,6   |
|                               |                  | Среднее с учетом потерь в зарядном устройстве  |   | 3,8   |

Таблица 4  
Расход энергии при получении бензина и дизельного топлива

| Процессы  | Преобладающие продукты     | Затраты энергии на производство 1 т светлых кг у.т. | Затраты энергии в % к продукту |
|---|----------------------------|---|--------------------------------|
| Первичная переработка (разгонка), включая облагораживание | Бензин и дизельное топливо | 280   | 19,0                           |
| Комбинированные установки каталитического крекинга        | Бензин и дизельное топливо | 300   | 20,5                           |
| Гидрокрекинг 150 атм                                      | Бензин                     | 265   | 18,0                           |
|   | Дизельное топливо          | 400   | 27,6                           |
| Легкий гидрокрекинг 50 атм                                | Дизельное топливо          | 268   | 18,5                           |

затраты энергии при добыче, переработке и транспортировке энергоресурсов и в процессе работы транспортного средства.

Типичные значения затрат энергии на получение автомобильных топлив из нефти приведены в табл. 4.

Как видно из таблицы, повышенные затраты энергии на производство дизельного топлива имеют место только для гидрокрекинга 150 атм. Однако следует указать, что применение установок гидрокрекинга при 150 атм определяется исключительно потребностью в авиакеросине. Поэтому можно считать, что затраты энергии на получение бензина и дизельного топлива примерно одинаковы и составляют 18–20%.

Номинальный КПД автомобиля с дизельным двигателем составляет примерно 30% (КПД двигателя — 34%, коробки перемены передач — 96%,

карданной передачи, заднего моста и подшипников колес — 97,5%, шин — 94,5%).

Номинальный КПД автомобиля с бензиновым двигателем составляет примерно 21,2% (КПД двигателя — 24%, коробки перемены передач — 96%, карданной передачи, заднего моста и подшипников колес — 97,5%, шин — 94,5%).

С учетом номинальных КПД автомобилей, средних значений коэффициента увеличения расхода энергии в условиях эксплуатации — 0,62 и потерь при добыче и транспортировке (принято всего лишь 1,5%) получается, что эффективность использования первичных энергоресурсов для автомобилей составляет (при затратах энергии на переработку нефти 19%):

для бензиновых автомобилей — 13,4%;  
для дизельных автомобилей — 19,1%.

При укрупненных расчетах эффективности мероприятий часто используются данные по средним удельным показателям. Однако такие методы можно применять лишь с большой осторожностью, особенно при использовании средних удельных расходов топлива, приходящегося на 1 кВт·ч энергии, вырабатываемой электростанциями, поскольку дополнительный расход топлива целиком зависит от характера добавляемой выработки [8, 9]. Поэтому при оценке энергетической эффективности электромобилей необходимо учитывать их особенность как потребителей в первую очередь ночной электроэнергии, когда нагрузка электростанций значительно уменьшается.

В настоящее время и в перспективе предусматривается, что атомные электростанции (АЭС) должны работать с постоянной нагрузкой, а оборудование теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) должно работать по тепловому графику теплопотребления, мало меняющемуся в течение суток. Поэтому практически вся неравномерность нагрузки приходится на тепловые электростанции (ТЭС) и гидроэлектростанции (ГЭС).

Переменная нагрузка наименее существенна для ГЭС. Поэтому во всех энергосистемах, включающих ГЭС, пики нагрузки покрываются ими. Распределение нагрузки между различными видами электростанций схематически показано на рис. 3.

Таким образом, говоря о возможности получения электрической энергии за счет выравнивания нагрузки электростанций, практически имеется в виду возможность догрузки теплоэлектростанций (на рис. 3 возможное дополнительное количество энергии —  $\Delta Q$ ).

Увеличение потребления топлива тепловыми электростанциями при дополнительной выработке электрической энергии за счет заполнения ночных провалов нагрузки ( $\Delta Q$ ) определяется уравнением

$$\Delta Q = \mathcal{E}_{\text{общ}} \epsilon_{\text{общ}} - \mathcal{E}_{\text{фак}} \epsilon_{\text{фак}}, \text{ кг у. т.}, \quad (1.2)$$

где  $\mathcal{E}_{\text{общ}}$  — суточная выработка электрической энергии на ТЭС с учетом догрузки, кВт·ч;  $\epsilon_{\text{общ}}$  — удельный расход топлива с учетом улучшения режима работы, кг у. т./кВт·ч;  $\mathcal{E}_{\text{фак}}$  — выработка электрической энергии ТЭС без учета догрузки, кВт·ч;  $\epsilon_{\text{фак}}$  — удельный расход топлива при режиме работы без догрузки, кг у. т./кВт·ч.

Отношение увеличения потребления топлива к дополнительно вырабатываемому количеству электроэнергии ( $\Delta Q$ ) дает условный удельный расход топлива ( $\epsilon_{\text{усл}}$ ), который и характеризует с народнохозяйственной точки зрения [8] энергетическую эффективность получения внепиковой энергии:

$$\epsilon_{\text{усл}} = \Delta Q / \Delta \mathcal{E}, \text{ кг у. т./кВт·ч.} \quad (1.3)$$

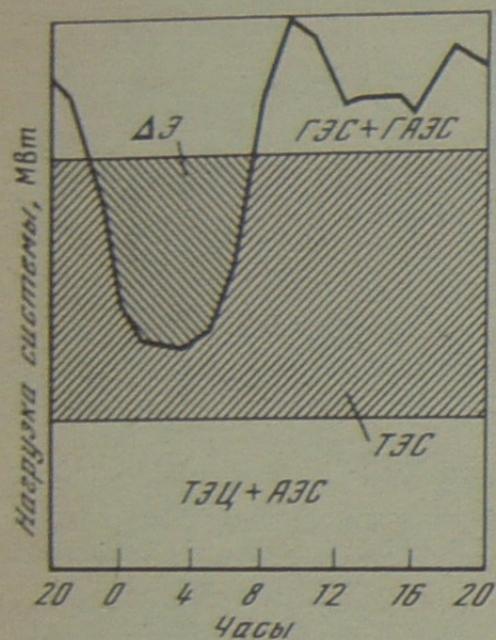


Рис. 3. Схема распределения нагрузки между различными видами электростанций

Рис. 4. Изменение условного удельного расхода топлива на выработку внепиковой энергии и показателей энергосистемы

1 — средний удельный расход топлива по энергосистеме; 2 — удельный расход топлива в ночные часы; 3 — удельный расход топлива по энергосистеме при полном выравнивании нагрузки и оптимизации структуры генерирующих мощностей; 4 — условный удельный расход топлива на выработку внепиковой энергии при неизменной структуре генерирующих мощностей; 5 — условный удельный расход топлива на выработку внепиковой энергии при оптимизации структуры генерирующих мощностей

В настоящее время расчет изменения условного удельного расхода топлива в зависимости от заполнения провала нагрузки может быть сделан только весьма приближенно, так как не представляется возможным учесть реальное распределение нагрузки между агрегатами, местные условия, определяющие первоочередность загрузки с учетом наличия различных видов топлива, и т. д. Поэтому полученные до сих пор зависимости изменения условного удельного расхода топлива на выработку внепиковой электроэнергии рассматриваются как приближенные, отображающие только общие тенденции их изменения. По имеющимся данным общей тенденцией изменения условного удельного расхода топлива при выработке внепиковой энергии является рост условного расхода топлива по мере заполнения ночного провала графика нагрузки. Возрастание дополнительного расхода топлива на единицу энергии по мере заполнения ночного провала обусловлено подключением в работу менее эффективных сравнительно маломощных агрегатов.

По данным [8] условный удельный расход топлива на выработку внепиковой энергии может составлять даже 0,2–0,21 кг у.т./кВт·ч. Проведения таких низких значений.

С учетом всего изложенного выше на рис. 4 показан наиболее вероятный

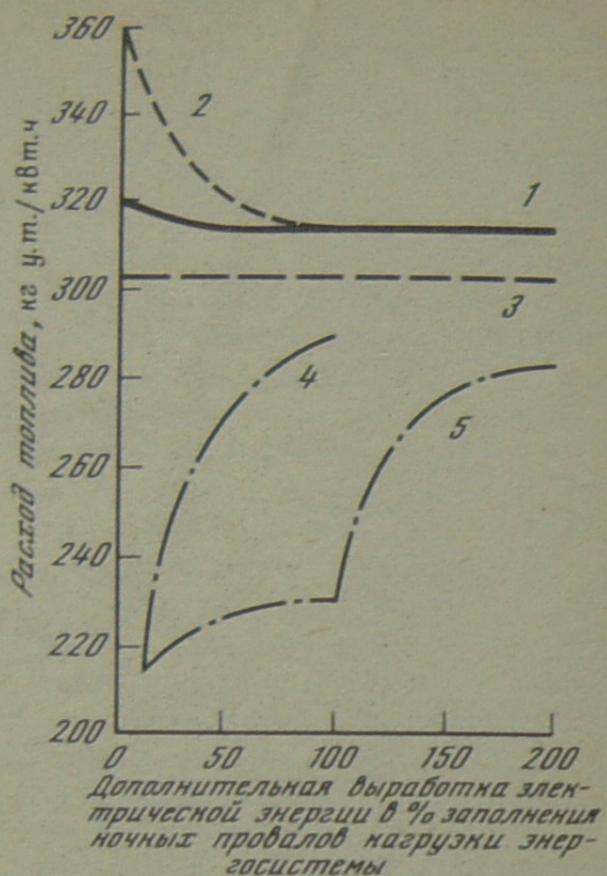
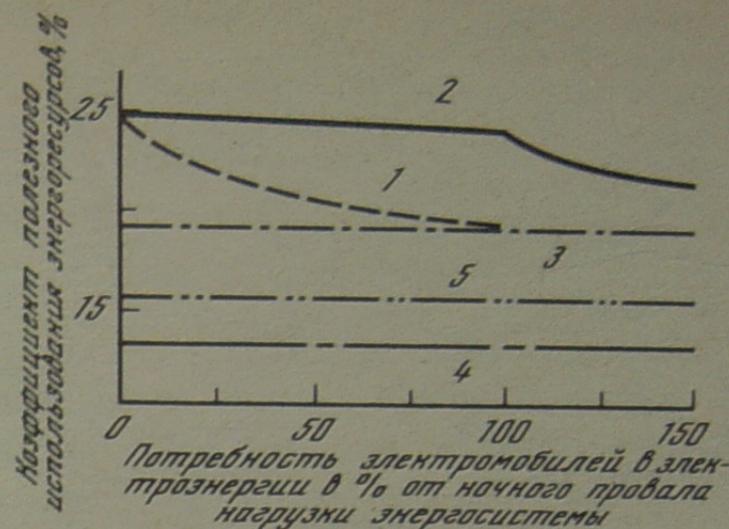


Рис. 5. Изменение коэффициента полезного использования первичных энергоресурсов аккумуляторными электромобилями в зависимости от заполнения ночного провала нагрузки энергосистем

1 — электромобили при сохранении структуры генерирующих мощностей; 2 — электромобили с учетом вытеснения маломощных маневренных агрегатов более экономичными; 3 — автомобили с дизелем; 4 — автомобили с бензиновым двигателем; 5 — электромобили при расчете по средним данным КПД электростанций



характер изменения значений условного удельного расхода топлива на выработку внепиковой энергии и изменение показателей энергосистемы в зависимости от заполнения ночного провала нагрузки.

Таким образом, полученные данные показывают, что если в среднем при выработке электрической энергии на тепловых электростанциях удельный расход топлива составляет в условном топливе 0,31–0,33 кг/кВт·ч (что соответствует КПД 0,37–0,4), то вырабатываемая ночью за счет выравнивания графика нагрузки электрическая энергия получается при дополнительных расходах топлива (в условном топливе) от 0,2–0,21 кг/кВт·ч (КПД — 59–61%) до 0,26–0,27 кг/кВт·ч (КПД — 46–47%) при полном заполнении провала нагрузки и при сохранении структуры генерирующих мощностей, а при оптимизации структуры мощностей расход возрастет только до 0,22–0,23 кг/кВт·ч (КПД — 54–56%).

Номинальный КПД аккумуляторного электромобиля составляет около 53% (КПД зарядного устройства — 94%, аккумуляторной батареи — 75%, системы регулирования — 96%, тягового электродвигателя — 85%, механической передачи — 97,5%, шин — 94,5%).

Принимая КПД электромобиля равным 0,53, коэффициент, учитывающий увеличение расхода энергии в условиях эксплуатации, равным 0,88, коэффициент добычи, переработки и транспортировки топлива равным 0,96 и коэффициент, учитывающий потери при передаче и распределении электрической энергии, — 0,92, были определены типичные значения коэффициента полезного использования первичных энергоресурсов электромобилями в зависимости от масштабов возможного их применения, определяющих потребность в энергии, и соответственно степень заполнения ночного провала нагрузки тепловых электростанций. Результаты расчетов приведены на рис. 5. На этом же рисунке нанесены данные, характерные для автомобилей с бензиновым двигателем и дизелем.

Как видно из рисунка, коэффициент полезного использования первичных энергоресурсов для электромобилей (с учетом целесообразного улучшения структуры мощностей составляет 22–25%) существенно выше, чем при расчете по средним данным, характерным в целом по электростанциям,

и превышает значения, характерные для автомобилей как с бензиновым двигателем (13,4%), так и с дизелем (19,1%).

Таким образом, аккумуляторные электромобили позволяют не просто заменить дефицитные нефтяные топлива другими видами горючего, но и обеспечивают при этом повышение эффективности использования первичных энергоресурсов.

Наконец, с народнохозяйственной точки зрения существенным преимуществом аккумуляторных электромобилей является возможность без дополнительных капитальных вложений в электростанции увеличить в определенных пределах выработку электрической энергии для электромобилей за счет догрузки агрегатов ТЭС в ночные часы. При этом возможное количество дополнительной электроэнергии ( $\Delta \mathcal{E}$ , рис. 3) определяется исходя из загрузки в ночные часы только незагруженного конденсационного оборудования ТЭС, т.е. учитывается, что оборудование ТЭС работает в наиболее экономичном режиме (по графику теплотребления) с возможной частичной разгрузкой в ночные часы даже при наличии в системе потребителей электрической энергии в это время. Это положение определяется тем, что, как правило, работа ТЭС в конденсационном режиме связана с возрастанием расхода топлива и является неэффективной.

Необходимо также отметить, что размеры ночных провалов нагрузки ТЭС в условиях летних суток по абсолютной величине меньше, чем в другие времена года, и составляют по ОЭС европейской части СССР всего около 60–65% от зимнего графика работы. Поэтому применительно к электромобилям размер провала летнего графика является в определенной мере ограничителем возможной величины дополнительного количества электроэнергии.

Исследования показывают, что ресурсы производства внепиковой электрической энергии обеспечивают, в случае ее использования для электромобилей, экономию нефтяных видов топлива в размере, превышающем общую суммарную экономию нефтяных топлив за счет других перспективных мероприятий технического прогресса на автомобильном транспорте: расширения применения дизелей, использования системы отключения вентилятора, применения газобаллонных автомобилей, улучшения качества шин, применения обтекателей, двигателей уменьшенной мощности, форкамерно-факельных двигателей, совершенствования систем питания и зажигания, уменьшения собственной массы.

Энергетическое преимущество электромобилей с электрохимическими генераторами, как уже отмечалось, заключается в гораздо более высоком КПД преобразования энергии по сравнению с двигателями внутреннего сгорания. Практически это преимущество с учетом характеристик изменения КПД оценивается в 2–3 раза.

Энергетические свойства электромобилей с комбинированной энергосиловой установкой зависят от типа подзарядного источника энергии и структуры построения энергосиловой установки.

Наибольшие работы к настоящему времени проведены по созданию электромобилей, в которых для подзарядки используются двигатель-генераторные установки по так называемой последовательной схеме, которая является достаточно простой, удобной в компоновочном плане и обеспечивает наиболее постоянный режим работы двигателя внутреннего сгорания. Однако из-за многократного преобразования энергии электромобили с последовательной схемой имеют повышенный расход топлива.

Баланс энергии бензинового двигателя при его использовании на электромобиле с последовательной схемой комбинированного питания может быть оценен для двух крайних режимов работы:

а) когда двигатель-генераторный агрегат работает непосредственно на тяговый электродвигатель;

б) когда двигатель-генераторный агрегат работает на зарядку аккумуляторной батареи.

Для случая "а" КПД электромобиля составляет около 17% (КП бензинового двигателя — 24%, генератора — 92%, системы регулирования — 98%, тягового электродвигателя — 86%, механической передачи и подшипников колес — 97,5%, шин — 94,5%).

Для случая "б" КПД электромобиля составляет около 11,8% (КП бензинового двигателя — 24%, генератора — 92%, системы регулирования — 98%, аккумуляторной батареи — 70%, тягового электродвигателя — 86%, механической передачи и подшипников колес — 97,5%, шин — 94,5%).

Действительный режим находится где-то между рассмотренными случаями. Однако в обоих случаях эффективность использования энергии бензина для электромобиля с комбинированной энергосиловой установкой хуже, чем для автомобиля с механической передачей, на 30–50%.

Применение несколько более сложных схем параллельного питания позволяет примерно на 10–15% уменьшить расход топлива электромобилем с комбинированной энергосиловой установкой [10]. Однако и в этом случае расход топлива получается выше, чем у однотипного автомобиля.

Расчеты показывают, что при использовании аккумуляторной батареи с большим запасом энергии и подзарядного агрегата малой мощности можно уменьшить потребление жидкого топлива за счет использования электроэнергии для подзарядки батареи. Однако в этом случае запас хода электромобиля получается ограниченным. Поскольку же при этом большую часть запаса хода обеспечивает аккумуляторная батарея, то такую схему можно рассматривать как одно из мероприятий по некоторому расширению возможностей чистого электромобиля за счет постановки на него небольшого подзарядного агрегата (если это является экономически выгодным).

### 1.3. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

В последние 15–20 лет перед человечеством встал ряд серьезных проблем, связанных с загрязнением атмосферного воздуха.

В настоящее время совершенно определенно установлено, что проблема уменьшения загрязнения атмосферного воздуха требует принятия действенных мер в отдельных районах и в большинстве крупных городов мира. Это обусловлено тем, что в результате человеческой деятельности в атмосферу выбрасываются вредные для окружающей среды и часто ядовитые для людей вещества. Эти вещества не успевают рассеиваться, и происходит местное устойчивое повышение их содержания в воздухе. По количеству и сумме вредного влияния намного опережают все другие выбросы следующие: окись углерода, окислы азота, окислы серы, углеводороды и твердые частицы. В табл. 5 приведены данные по выбросу указанных загрязнений в атмосферный воздух в США.

Как видно из таблицы, на автомобильный транспорт приходится значительная часть основных вредных выбросов: окиси углерода — около 75%, углеводородов — около 35%, окислов азота — около 30%.

Приведенные выше цифры по доле автомобильного транспорта в загрязнении атмосферы являются достаточно высокими, хотя относятся они ко всей стране. В городах и ряде районов (курортные зоны, промышленные районы), где на единицу площади приходится гораздо больше автомобилей, чем по всей стране, доля загрязнения атмосферного воздуха автомобилями значительно возрастает, что иллюстрируют данные табл. 6.

Таблица 5

## Выбросы вредных веществ в воздушный бассейн в США

| Годы и выбрасываемые вещества | Суммарные выбросы, млн. т | Контролируемые выбросы, млн. т |               |                               |                               | Неконтролируемые выбросы, млн. т | Доля автомобильного транспорта в суммарных выбросах, % |
|-------------------------------|---------------------------|--------------------------------|---------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|--|
|                               |                           | транспорт                      |               | Стационарное сгорание топлива | Промышленное сгорание топлива |                                  |  |
|                               |                           | всего                          | автомобильный |                               |                               |                                  |  |
| 1970 г.                       |                           |                                |               |                               |                               |                                  |  |
| Оксид углерода                | 113,7                     | 88,0                           | 77,4          | 1,5                           | 18,3                          | 5,9                              | 68,1   |
| Оксиды серы                   | 32,3                      | 0,7                            | 0,3           | 24,8                          | 6,7                           | 0,1                              | 0,9  |
| Углеводороды                  | 33,9                      | 14,1                           | 12,3          | 1,6                           | 5,5                           | 12,7                             | 36,3   |
| Твердые частицы               | 26,8                      | 1,3                            | 0,8           | 9,7                           | 14,8                          | 1,0                              | 3,0  |
| Оксиды азота                  | 22,7                      | 9,3                            | 7,0           | 12,3                          | 0,9                           | 0,2                              | 30,9   |
| 1977 г.                       |                           |                                |               |                               |                               |                                  |  |
| Оксид углерода                | 113,2                     | 94,5                           | 85,1          | 1,3                           | 12,0                          | 5,4                              | 75,2   |
| Оксиды серы                   | 30,2                      | 0,9                            | 0,4           | 24,7                          | 4,6                           | —                                | 1,3  |
| Углеводороды                  | 31,2                      | 12,7                           | 10,9          | 1,7                           | 11,9                          | 5,0                              | 34,9   |
| Твердые частицы               | 13,7                      | 1,2                            | 0,9           | 5,3                           | 6,4                           | 0,8                              | 6,6  |
| Оксиды азота                  | 25,5                      | 10,1                           | 7,4           | 14,3                          | 0,9                           | 0,1                              | 29,0   |

Таблица 6

## Доля автомобильного транспорта в общем загрязнении атмосферы в крупнейших городах мира

| Город (страна)     | Доля автомобильного транспорта от общего количества токсических веществ, выбрасываемых в атмосферу города, % |              |              |
|--------------------|--|--------------|--------------|
|                    | оксид углерода   | углеводороды | оксиды азота |
| Мадрид (Испания)   | 95   | 90           | 35           |
| Стокгольм (Швеция) | 99   | 93           | 53           |
| Токио (Япония)     | 99   | 95           | 33           |
| Торонто (Канада)   | 98   | 69           | 19           |
| Лос-Анджелес (США) | 98   | 66           | 72           |
| Москва (СССР)      | 96,3   | 64,4         | 32,6         |
| Ленинград (СССР)   | 88,1   | 79,0         | 31,7         |

Как видно из таблицы, в крупнейших городах мира загрязнение атмосферного воздуха оксидом углерода практически полностью определяется автомобильным транспортом.

При движении аккумуляторного электромобиля не происходит загрязнения атмосферы вредными веществами. Однако отметим, что в процессе зарядки современных аккумуляторов в воздушный бассейн поступает ряд вредных веществ (количественно преобладают пары щелочи). Однако следует учесть, что в настоящее время начинают применяться герметичные стартерные и тяговые аккумуляторы. Что же касается перспективных типов аккумуляторов (натрий-сера, литий-сульфид железа и др.), то они из-за физико-химических свойств своих активных материалов мо-

гут быть только герметичными. Поэтому вопрос выброса вредных веществ в результате эксплуатации аккумуляторных батарей является несущественным.

Научное и практическое значение имеет учет загрязнения атмосферы тепловыми электростанциями, которое будет иметь место при увеличении выработки электрической энергии для электромобилей. Поэтому оценка экологической эффективности электромобилей состоит прежде всего в определении и сопоставлении количеств вредных веществ, выбрасываемых в процессе эксплуатации автомобилем и электромобилем. При этом на современном этапе развития знаний, вероятно, целесообразно ограничиться рассмотрением только основных видов загрязнителей (окиси углерода, углеводородов, окислов азота и окислов серы), так как другие выбросы от автомобилей и электростанций имеют гораздо меньшее значение.

Во всех технически развитых странах, в том числе и в СССР, для оценки количества вредных веществ, выбрасываемого автомобилями, применяется экспериментальная величина пробегового выброса. Учет только пробегового выброса позволяет определить "условный выброс". Для расчета фактических (реальных) выбросов необходима корректировка значений пробеговых выбросов с учетом выброса вредных веществ с картерными газами и испарениями топлива, с учетом различных природно-климатических условий, условий движения, технического состояния автомобилей.

В соответствии с принятой в СССР методикой для автомобилей рассматриваемого региона (страна, город и т.п.) масса выброшенного за расчетный период  $\tau$  вредного вещества  $j$  ( $M_j^T$ ) с учетом наличия автомобилей с  $k$  типами ДВС (бензиновых, дизельных, на сжиженном газе и др.) определяется следующим образом:

$$M_j^T = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^k b_{jik} N_{ik} l_{ik} m_{jik} \prod_{n=1}^n k_{jkn}, \tau, \quad (1.4)$$

где  $i$  — количество групп автомобилей;  $N_{ik}$  — количество автомобилей в  $i$ -й группе с двигателем  $k$ -го типа на расчетный период, тыс.шт.;  $l_{ik}$  — средний пробег автомобилей  $i$ -й группы с двигателем  $k$ -го типа за расчетный период, тыс. км;  $m_{jik}$  — пробеговый выброс  $j$ -го вредного вещества автомобилем  $i$ -й группы с двигателем  $k$ -го типа за расчетный период, г/км;  $k_{jkn}$  — коэффициент учета влияния  $n$ -го фактора на выброс  $j$ -го вещества автомобилями  $i$ -й группы с двигателем  $k$ -го типа в рассматриваемом регионе;  $b_{jik}$  — коэффициент учета выброса  $j$ -го вещества автомобилями  $i$ -й группы с двигателем  $k$ -го типа в рассматриваемый период с картерными газами и испарениями топлива.

Величина пробегового выброса автомобиля зависит от его типа, полной массы, вида применяемого двигателя и т.д.

Для аккумуляторных электромобилей масса выброшенного за расчетный период  $\tau$  вредного вещества  $j$  ( $M_{j3}^T$ ) определяется следующим образом:

$$M_{j3}^T = \frac{q_i}{\eta_6 \eta_3 \eta_{II}} \sum_{i=1}^i Q_{3i} L_{Ti}, \tau, \quad (1.5)$$

где  $Q_{3i}$  — удельный расход электроэнергии электромобилем  $i$ -й группы, кВт · ч/км;  $L_{Ti}$  — пробег электромобилей  $i$ -й группы за расчетный период, тыс. км;  $\eta_6$  — КПД аккумуляторных батарей по энергии;  $\eta_3$  — КПД зарядных устройств;  $\eta_{II}$  — КПД передачи от электростанции до зарядных устройств;  $q_i$  — удельный выброс  $i$ -го вредного вещества тепловыми электростанциями при выработке 1 кВт · ч, кг/кВт · ч.

Таблица 7

Загрязнение воздушного бассейна различными типами автомобилей и электромобилей

| Тип автомобиля (грузоподъемность, т)      | Вредные вещества | Выброс вредных веществ на 1 км пробега, г |   |
|---|------------------|---|---|
|   |                  | автомобиль с бензиновым двигателем        | электромобиль (за счет выбросов электростанций) |
| Особо малой грузоподъемности (0,25–0,4 т) | Окись углерода,  | 31,6                                      | —   |
|   | углеводороды,    | 4,6                                       | —   |
|   | окислы азота,    | 0,9                                       | 0,6   |
|   | окислы серы      | —   | 2,6   |
| Малой грузоподъемности (0,8–1,0 т)        | Окись углерода,  | 42,5                                      | —   |
|   | углеводороды,    | 5,0                                       | —   |
|   | окислы азота,    | 1,0                                       | 0,9   |
|   | окислы серы      | —   | 3,7   |

Средние расчетные данные по загрязнению воздушного бассейна различными типами автомобилей и аккумуляторных электромобилей приведены в табл. 7.

Как видно из таблицы, аккумуляторные электромобили выбрасывают в атмосферу примерно раз в 10–12 меньше вредных веществ. Однако такое сопоставление является не совсем правильным, поскольку выбрасываемые автомобилем вредные вещества ни по составу, ни по непосредственному воздействию на население города не сопоставимы с выбросами электростанций, на которых будет производиться выработка энергии для электромобилей. Поэтому сопоставимость электромобиля и автомобиля (влияние на окружающую среду) может быть обеспечена только с учетом различия экономических ущербов от вредного воздействия на окружающую среду рассматриваемых вариантов.

Проведенные расчеты ущерба от загрязнения автомобилями и аккумуляторными электромобилями показали, что ущерб в случае замены автомобилей электромобилями уменьшается в 7–8 раз. При этом следует иметь в виду, что, рассматривая выброс вредных веществ электростанциями, мы одновременно не учитываем загрязнение атмосферы при получении автомобильных топлив из нефти, в то время как нефтеперерабатывающая промышленность является самым крупным загрязнителем атмосферы углеводородами. Поэтому действительная экологическая эффективность электромобилей еще больше. Следует также иметь в виду, что уменьшить выброс вредных веществ электростанциями относительно более просто, чем провести равноценные мероприятия по многомиллионному парку автомобилей.

В качестве примера укажем на опыт США: по данным ЕРА стоимость всех расходов на уменьшение загрязнения атмосферы в этой стране составили в 1975–1978 гг. около 42 млрд. долл., в том числе около 30 млрд. долл. на уменьшение загрязнения от автотранспорта. Однако, несмотря на столь большие затраты, удалось только замедлить рост количества выбросов вредных веществ.

Наконец, следует учесть, что в перспективе для аккумуляторных электромобилей можно будет использовать экологически чистую атомную энергию, а в дальнейшем, вероятно, и термоядерную.

В случае использования водородно-воздушных топливных элементов

(электрохимических генераторов) такие электромобили практически не будут загрязнять атмосферу.

В экологическом плане преимущество электромобилей с комбинированной энергосиловой установкой типа двигатель-генератор и аккумуляторная батарея заключается в более постоянном режиме работы двигателя (по сравнению с режимом работы автомобильного двигателя). Это позволяет обеспечить такой режим работы двигателя внутреннего сгорания, при котором общее количество вредных веществ на единицу пробега уменьшается (окиси углерода и углеводородов примерно в 2 раза). Однако выброс окислов азота, борьба с которыми для двигателей внутреннего сгорания наиболее сложна, не только не уменьшается, но и несколько (примерно на 10–15%) увеличивается [15].

Электромобили с комбинированным питанием контактная сеть + аккумуляторная батарея обладают в экологическом отношении точно такими же преимуществами, как и чисто аккумуляторные электромобили.

#### 1.4. МАСШТАБЫ ВОЗМОЖНОГО ПРИМЕНЕНИЯ И ОБЪЕМ ТРАНСПОРТНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Присущие электромобилям экологические преимущества и ограниченность запаса хода обуславливают их перспективность в первую очередь для применения в крупнейших городах, причем перспективность электромобилей для различных крупнейших городов неодинакова.

Как известно, емкость аккумуляторов зависит от температуры электролита. С понижением температуры емкость заметно уменьшается вследствие увеличения вязкости электролита, вызывающей в свою очередь ухудшение диффузии, возрастание сопротивления электролита и уменьшение напряжения.

Изменение емкости аккумуляторов в зависимости от температуры учитывается при расчете запаса хода электромобиля температурным коэффициентом емкости. Результаты расчетов влияния температуры электролита на значение среднеексплуатационного запаса хода электромобилей применительно к современным щелочным аккумуляторам приведены на рис. 6.

Как видно из рисунка, при температуре электролита  $-20^{\circ}\text{C}$  и ниже запас хода электромобилей уменьшается в несколько раз, а при  $-40^{\circ}\text{C}$  и ниже в ряде случаев движение электромобиля вообще невозможно.

Температурный режим батареи зависит от температуры наружного воздуха, условий хранения электромобиля, условий теплообмена батареи и окружающей среды, времени движения, режима нагрузки и т.д. Однако в любом случае применение электромобилей в городах с холодным климатом (температуры  $-20^{\circ}\text{C}$  и ниже) связано с рядом затруднений: необходимо утеплять батарею, а в ряде случаев и обогревать ее в процессе движения и перед постановкой на зарядку, так как в противном случае температура электролита понижается и соответственно уменьшается запас хода электромобиля.

Мероприятия по поддержанию необходимого температурного режима работы батареи в условиях холодного климата увеличивают стоимость электромобиля, повышают его массу, что ведет к уменьшению запаса хода.

Таким образом, развитие применения электромобилей в городах, расположенных в зоне холодного климата, на первом этапе является нецелесообразным.

Другим важным фактором, ограничивающим возможность применения электромобилей в крупнейших городах, являются дорожные условия. Ули-

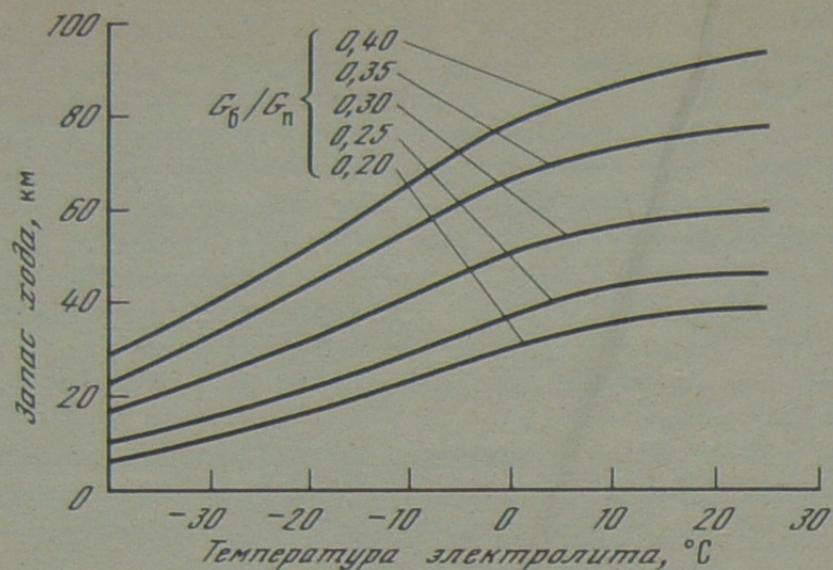


Рис. 6. Зависимость среднеексплуатационного запаса хода электромобиля от температуры электролита при различных отношениях массы батареи к полной массе ( $G_б/G_п$ )

цы и дороги в городах имеют усовершенствованное покрытие, и в этом отношении все города примерно равноценны. Значительное различие имеет место в продольных уклонах улиц для городов, расположенных в различной местности. Так, например, относительные амплитуды высот местности на протяжении 2000 м составляют для равнинного рельефа 20 м, а для гористого и горного — соответственно 200–800 и более 800 м; средний уклон местности для равнинного рельефа составляет до 10‰, а для гористого и горного — соответственно 100–400 и более 400‰. При строительстве городских улиц и дорог проводится выравнивание рельефа. Тем не менее в городах, расположенных в горной местности, имеются улицы и дороги местного значения с продольным уклоном до 100‰.

Влияние продольного уклона на запас хода электромобиля показано на рис. 7. Как видно из графика, при движении на подъем 100‰ запас хода электромобиля уменьшается более чем в 2 раза, что резко сужает возможности применения электромобилей. Поэтому в настоящее время, когда энергоемкость аккумуляторных батарей весьма ограничена, применение электромобилей в городах, расположенных в горной местности, нецелесообразно.

Однако одно географическое определение является недостаточно полной характеристикой полигона перспективного применения электромобилей. Необходимо его дополнить количественной характеристикой: сколько и какого типа автомобилей используется и будет использоваться в будущем для обслуживания крупнейших городов, в которых перспективно применение электромобилей?

Для установления количественной характеристики полигона возможности применения электромобилей было проведено исследование развития численности автомобильных парков в крупнейших городах СССР по следующим группам: грузовые и специальные автомобили, автобусы, легковые автомобили-такси, легковые служебные автомобили и легковые автомобили индивидуального пользования.

Поскольку уже в настоящее время количество городов, где применение электромобилей является перспективным, довольно велико, то разработка отдельных прогнозов по каждому из городов является весьма трудоемкой задачей. Поэтому в первом приближении могут быть использованы общие

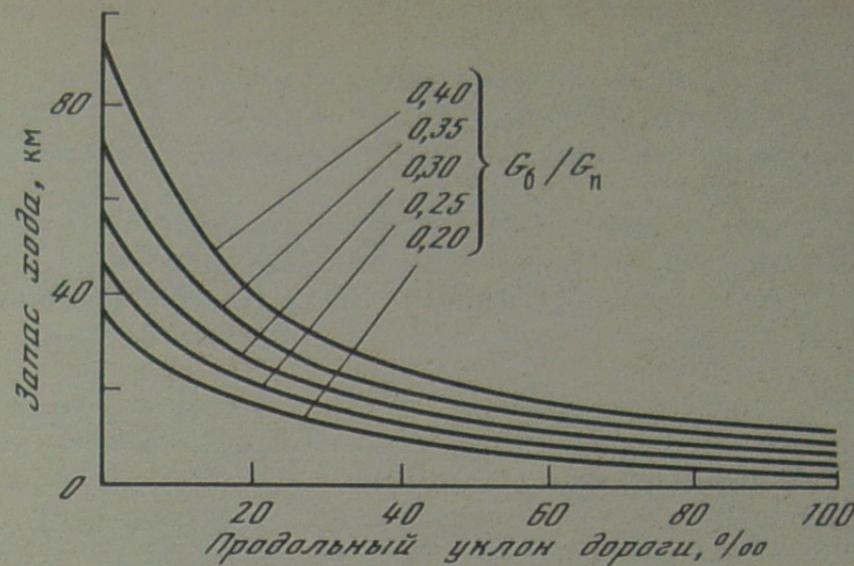


Рис. 7. Влияние продольного уклона дороги на запас хода электромобиля при различных отношениях массы батареи к полной массе ( $G_б/G_п$ )

закономерности развития численности автомобильных парков крупнейших городов.

Известно, что развитие городского транспорта тесно связано с численностью населения города. Причем для крупных городов влияние других важных факторов (планировочная организация города, взаиморасположение жилых и промышленных зон, характер расселения жителей, размещение важнейших фокусов тяготения, условия рельефа и т.п.) является, как правило, менее существенным.

Математическая обработка статистических данных показала, что на каждый период времени  $\tau$ , год, между численностью парка автомобилей  $n$  каждой группы и численностью населения  $m$  существует линейная зависимость типа

$$n_\tau = A_\tau + B_\tau m_\tau, \text{ тыс. шт.}, \quad (1.6)$$

где  $A_\tau$  и  $B_\tau$  — постоянные для периода  $\tau$ .

Коэффициент корреляции для всех групп автомобилей превышает 0,985. Другие показатели тесноты связи также удовлетворяют требованиям, предъявляемым теорией корреляционного анализа.

Рассмотрение уравнений типа (1.6) для различных периодов времени показывает, что при этом практически изменяется только коэффициент  $A_\tau$ , причем в зависимости от времени: чем ближе к настоящему периоду, тем коэффициент  $A$  больше. Поэтому имеется возможность перейти к определению численности парков автомобилей одновременно от двух факторов — численности населения города и года. При этом коэффициенты корреляции несколько возрастают при использовании уравнения типа

$$n_\tau = A + B_\tau m + C_\tau z, \text{ тыс. шт.}, \quad (1.7)$$

где  $z$  — год (1970, 1971 и т.д.);  $C_\tau$  — постоянная для каждой группы автомобилей за определенный период.

Физическая сущность дополнительного члена ( $C_\tau z$ ) в уравнении (1.7) заключается в отображении имеющих место под влиянием различных факторов (рост благосостояния, изменение планировочной организации и т.д.) изменений во времени потребности в работе транспорта. Другими словами, уравнение учитывает реальный ежегодный рост насыщения городов различными типами автомобилей. При этом следует отметить, что увеличение

численности автомобилей отдельных групп в зависимости от года имеет различный характер:

— для грузовых (и специальных) автомобилей коэффициент  $C$  (т.е. изменение парка в зависимости от года) имеет тенденцию к росту и за последние 8–10 лет увеличился в 1,3 раза; при этом он заметно влияет на общую численность парка;

— для автобусов коэффициент  $C$  практически мало менялся в последние 10 лет, но его влияние на общую численность существенно;

— для легковых автомобилей-такси и ведомственных численность парка мало зависит от года (последние 8–10 лет), т.е. коэффициент  $C$  мал и его изменение незначительно;

— для легковых индивидуальных автомобилей насыщенность в последнее время из года в год заметно возрастает и соответственно коэффициент  $C$  быстро меняется и начинает оказывать все возрастающее влияние.

Анализ генеральных схем развития ряда городов позволяет определить значения коэффициентов уравнения (1.7) на перспективу.

В предельном случае, когда электромобили по своим технико-экономическим параметрам смогут полностью заменить в крупнейших городах страны автомобили с двигателями внутреннего сгорания, масштабы возможного применения электромобилей определяются численностью автомобильных парков на полигоне перспективного применения.

Для определения масштабов возможного использования электромобилей в случаях, когда они могут заменить только часть автомобилей на внутригородских перевозках, достаточно (зная общую численность парка) установить, какую часть в общем парке могут составлять электромобили.

В общем случае возможная численность парка электромобилей  $i$ -го типа  $N_i$  определяется по формуле

$$N_i = \nu n_i, \text{ тыс. шт.}, \quad (1.8)$$

где  $\nu$  — доля электромобилей в общем парке машин данного типа;  $n_i$  — численность парка  $i$ -го типа машин на перспективном полигоне в рассматриваемый период времени, тыс. шт.

Для определения возможной доли электромобилей в общем парке машин  $i$ -го типа (для перспективного полигона) используется следующий метод: доля электромобилей принимается численно равной доле автомобилей, имеющих фактический суточный пробег в пределах среднеэксплуатационного запаса хода электромобилей данного типа.

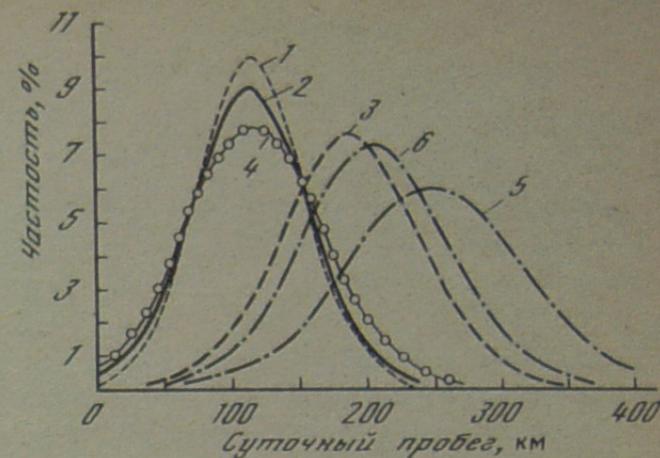
Очевидно, что электромобили практически не могут охватить все перевозки с дневным пробегом в пределах их среднеэксплуатационного запаса хода. Однако существуют определенные возможности расширения сфер применения электромобилей за счет использования подзарядки и смены батарей в течение рабочего дня, т.е. электромобили могут обслуживать и какую-то часть перевозок, где пробег превышает их запас хода. Последнее обстоятельство и позволяет считать возможную численность электромобилей довольно близкой той, которая получается на основе определения доли парка, приходящегося на обслуживание перевозок с суточным пробегом в пределах среднеэксплуатационного запаса хода электромобилей.

Многочисленные данные обследований показывают, что для всех типов автомобилей, эксплуатирующихся в крупных городах СССР, распределение значений суточных пробегов подчиняется нормальному закону. Это позволяет, используя уравнение Гаусса, получить на основе фактических дискретных данных сглаженную непрерывную функцию распределения суточных пробегов различных типов автомобилей.

Построенные таким образом кривые распределения суточных пробегов

Рис. 8. Распределение суточных пробегов различных типов автомобилей при эксплуатации в крупнейших городах

1 — грузовые малой грузоподъемности; 2 — грузовые средней грузоподъемности; 3 — грузовые большой грузоподъемности; 4 — легковые служебные; 5 — легковые такси; 6 — автобусы



различных типов автомобилей при их эксплуатации в крупнейших городах СССР показаны на рис. 8.

Как известно, нормальное распределение признака наблюдается в тех случаях, когда на величину признака явления действует множество случайных, независимых или слабо зависимых факторов, каждый из которых играет в общем итоге относительно незначительную роль. Этот вывод математической статистики означает, что выявленные закономерности распределения суточных пробегов не могут существенно измениться при замене автомобилей электромобилями, т.е. тем самым подтверждается правомерность принятого метода исследования возможности применения электромобилей, опираясь на существующие закономерности распределения суточных пробегов.

Поскольку доля электромобилей в парке была принята равной доле автомобилей, имеющих суточные пробеги в пределах среднеэксплуатационного запаса хода электромобилей, и с учетом того, что изменение доли автомобилей от величины суточного пробега представляет собой интегральную функцию распределения, имеем

$$\nu = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} dx, \quad (1.9)$$

где  $x$  — случайная величина пробега, км;  $\bar{x}$  — средняя арифметическая, км;  $\sigma$  — среднее квадратическое отклонение.

Вычисление по формуле (1.9) связано с затруднениями, вследствие того что входящий в формулу интеграл является неберущимся. Поэтому в математической статистике используется особая функция, называемая функцией Лапласа. Для этой функции, зависящей от одного аргумента, составлены таблицы.

Если в формуле (1.9) перейти под интегралом к новой переменной  $t = (x - \bar{x})/\sigma$ , то, опуская известные из литературы выкладки, получим

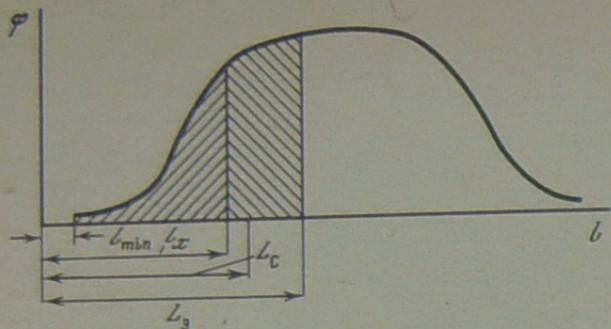
$$\nu = 0,5 [\Phi(t) + 1], \quad (1.10)$$

где  $\Phi(t)$  — функция Лапласа.

Таким образом, используя полученные данные по распределению суточных пробегов автомобилей по формуле (1.10), с помощью таблицы функций Лапласа можно определять возможную долю электромобилей в общем парке машин данного типа на перспективном полигоне.

При расчете на ЭВМ обычно имеются специальные подпрограммы для вычисления функции Лапласа. Можно также вычислить эту функцию путем ее разложения в ряд Маклорена.

Рис. 9. Определение значения среднесуточного пробега автомобиля



При ручных способах расчета наиболее удобным является использование графиков зависимости потребности народного хозяйства в автомобилях различных типов (в долях от парка соответствующих типов

автомобилей, эксплуатирующихся на перспективном для автомобилей полигоне) от их среднеексплуатационного запаса хода.

Годовой объем транспортной работы автомобиля определяется по известной формуле:

$$V_T = q \gamma \beta L_c D \alpha, \text{ ткм или пасс.-км,} \quad (1.11)$$

где  $q$  — номинальная грузоподъемность, т, или вместимость, чел.;  $\gamma$  — среднегодовой коэффициент использования грузоподъемности или вместимости;  $\beta$  — среднегодовой коэффициент использования пробега;  $L_c$  — средний суточный пробег, км;  $D$  — количество дней в году (365);  $\alpha$  — коэффициент использования.

Для конкретного случая, когда автомобиль должен заменить автомобиль, для которого известны все составляющие формулы (1.11), расчет производительности не составляет особой трудности. Однако для крупномасштабных расчетов по парку имеются определенные затруднения в определении среднесуточного пробега. Дело в том, что во всех предыдущих исследованиях по автомобилям расчет производительности велся по запасу хода, т. е. суточный пробег принимался равным запасу хода автомобиля. Однако такое совпадение является, скорее всего, исключением.

Как было показано выше, фактические суточные пробеги каждого типа автомобильных транспортных средств могут быть представлены в виде определенных законов распределения. Пусть, например, распределение фактических суточных пробегов рассматриваемого типа автомобильных транспортных средств (такси или грузовые автомобили малой грузоподъемности, или др.) представлено в виде распределения (рис. 9), описываемого уравнением  $\varphi = F(l)$ . Тогда очевидно, что автомобили со среднеексплуатационным запасом хода  $L_3$  будут обслуживать в первую очередь перевозки, где суточные пробеги менее  $L_3$ , т. е. фактические суточные пробеги автомобилей будут охватывать область от  $l_{\min}$  до  $L_3$ . В этом случае среднее значение суточных пробегов всех автомобилей определяется из соотношения

$$\int_{l_{\min}}^{L_3} F(l) dl = \int_{l_x}^{L_3} F(l) dl. \quad (1.12)$$

Геометрически (рис. 9) значение  $l_x$  есть абсцисса такой точки кривой распределения, ордината которой делит площадь под кривой на две равные части.

Учитывая, что выше было доказано, что распределение суточных пробегов подчиняется нормальному закону, и обозначив  $l_x$  через  $x_c$ , уравнение (1.12) можно представить, опуская промежуточные выкладки, в следующем виде:

$$2 \operatorname{erf}(x_c \sqrt{2\sigma}) = \operatorname{erf}(x \sqrt{2\sigma}). \quad (1.13)$$

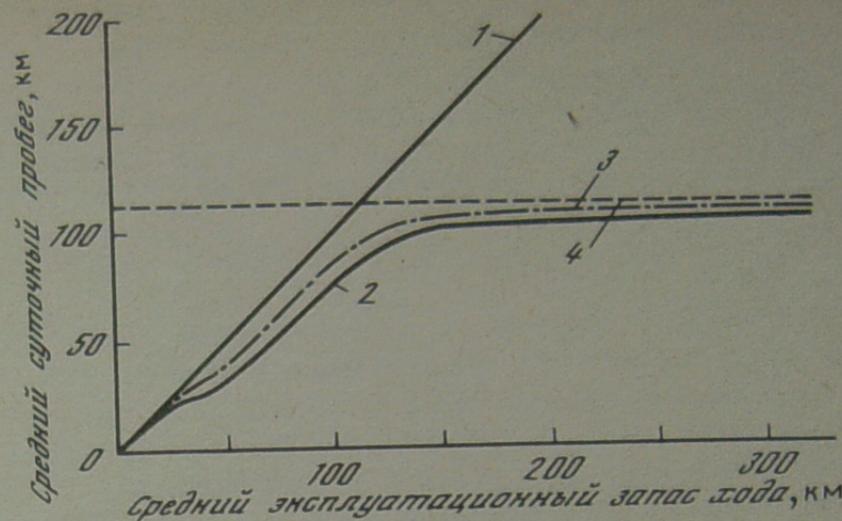


Рис. 10. Сравнение различных методов оценки среднесуточного пробега автомобилей

1 — условие равенства среднесуточного пробега автомобиля его среднеексплуатационному запасу хода; 2 — среднесуточный пробег по парку автомобилей без применения подзарядки или смены аккумуляторных батарей; 3 — среднесуточный пробег по парку автомобилей с учетом применения подзарядки и смены аккумуляторных батарей; 4 — среднесуточный пробег по парку автомобилей данного типа

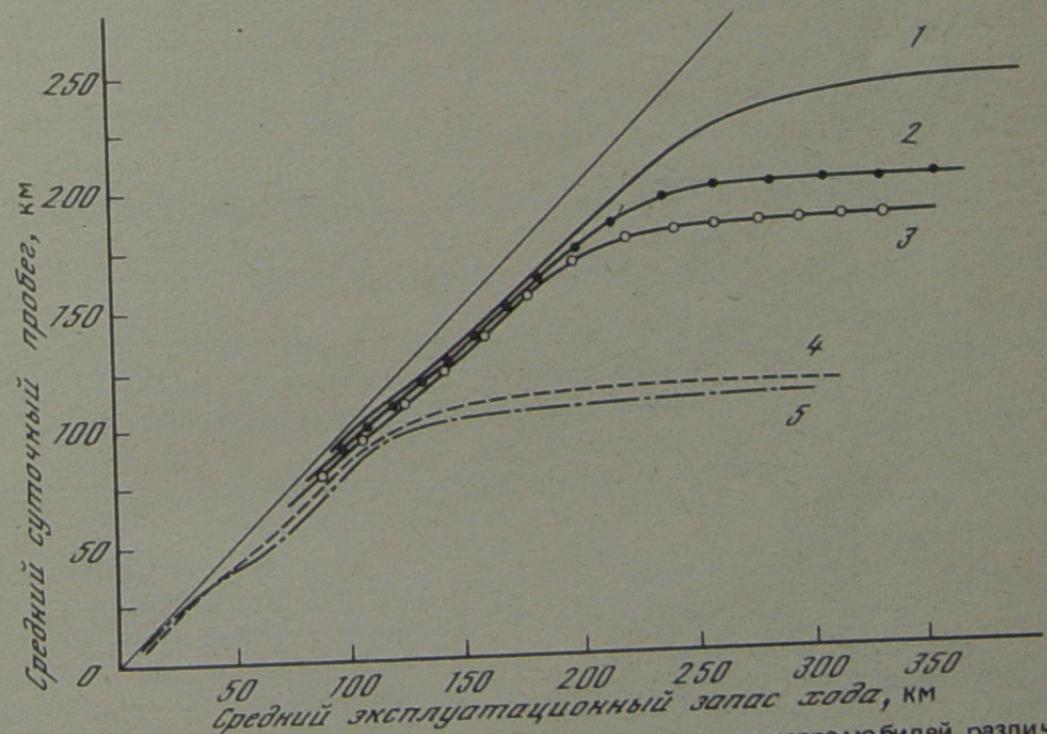


Рис. 11. Изменение среднего суточного пробега по парку автомобилей различных типов в зависимости от их запаса хода

1 — легковые такси; 2 — электробусы; 3 — грузовые большой грузоподъемности; 4 — легковые служебные; 5 — грузовые средней грузоподъемности

Уравнение (1.13) в неявном виде определяет функцию  $x_c = f(x)$ . Выражение в явном виде этой функции невозможно. Поэтому был использован графический способ решения уравнения, основанный на полученном равенстве, из которого следует, что средний суточный пробег по парку автомобилей, имеющих запас хода  $x_L$ , равен пробегу, соответствующему половине возможной доли парка.

Если бы в эксплуатации электромобили не могли иметь за счет использования подзарядки или смены батарей пробегов больше, чем среднее эксплуатационный запас хода, то тогда средний суточный пробег определялся бы как значение  $x_c$ . Поскольку же в эксплуатации может применяться и подзарядка, и смена батарей, то среднесуточный пробег должен быть в этом случае несколько большим. Поэтому в настоящей работе он определялся по уравнению

$$L_c = x_c + n(L_{\text{пред}} - x_c), \text{ км}, \quad (1.14)$$

где  $n$  — коэффициент увеличения пробега (принимался равным 0,3);  $L_{\text{пред}}$  — предельно возможное значение среднего пробега, км.

$L_{\text{пред}}$  принимается равным значению запаса хода, когда последний меньше среднесуточного пробега по всему парку автомобилей данного типа на перспективном полигоне, или равным среднесуточному пробегу, когда значение запаса хода становится больше.

Результаты применения рассмотренного метода оценки среднесуточного пробега электромобилей в сравнении с условием равенства среднесуточного пробега электромобиля его запасу хода иллюстрирует рис. 10.

Учитывая невозможность аналитического решения уравнения (1.14), для практического использования рассмотренного выше метода были построены (на основе графического решения) графики зависимостей среднесуточного пробега электромобилей различных типов от их запаса хода. Эти зависимости показаны на рис. 11.

## ГЛАВА 2

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

#### 2.1. АККУМУЛЯТОРНЫЕ БАТАРЕИ

В настоящее время для электромобилей могут использоваться различные типы аккумуляторов (табл. 8). Однако практически применяются лишь свинцовые и железо-никелевые. Наибольшее применение на электромобилях находят свинцовые аккумуляторы.

По конструкции пластин (главным образом положительных) свинцовые тяговые аккумуляторы делятся на намазные и панцирные.

Намазные аккумуляторы применяются в качестве стартерных батарей обычных автомобилей. Поэтому их конструкция достаточно хорошо известна. Основным недостатком аккумуляторов с намазными пластинами является относительно небольшой срок службы (до 500 циклов), обусловливаемый разрушением и выпадением активной массы из положительных пластин.

Гораздо более высоким сроком службы обладают панцирные тяговые свинцово-кислотные аккумуляторы, имеющие панцирный трубчатый положительный электрод и намазной отрицательный электрод. Трубчатый панцирный электрод, изготовленный из синтетических материалов, позволяет значительно уменьшить выпадение активной массы из положительных пластин и тем самым увеличить срок службы аккумулятора до 1600—1800 циклов.

Панцирная пластина состоит из ряда пористых или снабженных узкими прорезями трубок, внутри которых заключена активная масса. Решетка такой пластины имеет ряд вертикальных параллельных стержней из свин-

Таблица 8  
Основные параметры различных типов аккумуляторов

| Применение на электромобилях                             | Тип аккумулятора                           | Удельная энергоемкость при 5-часовом разряде, Вт·ч/кг | Удельная мощность, Вт/кг* | Срок службы, циклы | Современное состояние развития работ  |
|--|--|---|---------------------------|--------------------|---|
| На электромобилях, находящихся в практическом применении | Свинцово-кислотный с намазными пластинами  | 32—45   | 25—45 (200)               | 100—300            | Промышленное производство, в т.ч. и для электромобилей<br>Промышленное производство, преимущественно для тяги и в т.ч. для электромобилей<br>Промышленное производство, в т.ч. и для тяги<br>Промышленное производство, в т.ч. и для тяги, а также для электромобилей |
|  | Свинцово-кислотный с панцирными пластинами | 30—36   | 20—40 (160)               | 1000—1800          |   |
| На опытных электромобилях                                | Никель-железный с ламельными пластинами    | 25—30   | 25—40 (200)               | 1500—2000          | Промышленное производство<br>То же<br>Опытное производство<br>Опытные образцы<br>То же<br>" "<br>" "<br>" "<br>Лабораторные разработки  |
|  | Никель-железный с безламельными пластинами | 30—35   | 28—45 (260)               | 1000—1500          |   |
|  | Кадмиево-никелевый                         | 30—37   | 30—50 (400)               | 2000—3000          |   |
| Предлагаемые для электромобилей в будущем                | Серебряно-цинковый                         | 55—100  | 60—100 (400)              | 150—250            | Промышленное производство<br>То же<br>Опытное производство<br>Опытные образцы<br>То же<br>" "<br>" "<br>" "<br>Лабораторные разработки  |
|  | Никель-цинковый                            | 48—55   | 55—90 (350)               | 200—300            |   |
|  | Натрий-серный                              | 130—300   | до 300                    | 50—500             |   |
|  | Цинк-воздушный                             | 70—150  | до 80.                    | 100—250            |   |
|  | Железо-воздушный                           | 60—90   | до 60                     | 100—400            |   |
|  | Никель-водородный                          | 40—60   | до 30                     | 600—800            |   |
|  | Цинк-хлорный                               | 100—160   | до 150                    | 100—200            |   |
|  | Литий-хлорный                              | 150—350   | до 350                    | ?                  |   |

\* В скобках даны максимальные значения удельной мощности, которая может быть получена в течение короткого промежутка времени (несколько минут).

цово-сурьмянистого сплава, отлитых заодно с верхней кромкой решетки и припаяваемых к нижней кромке решетки после заполнения трубочек активной массой. В современных моделях нижняя свинцовая кромка заменена литой пластмассовой планкой. Нижние концы стержней впрессовываются в эту планку.

Каждый стержень представляет собой как бы сердечник карандаша, состоящего из активной массы, заключенной в панцирь. Благодаря пористости или прорезам в панцире обеспечивается свободный доступ электролита к активной массе. Одновременно панцирь предохраняет активную массу от вымывания. В крайних трубах решеток наружные стороны панциря в целях усиления делаются сплошными.

Сама конструкция панциря и материалы, из которых он изготавливается, весьма разнообразны. Сепараторы современных свинцовых аккумуляторов изготавливаются преимущественно на основе поливинилхлорида или стекловолокна. Применяются также сепараторы на основе полиэтилена и различных сополимеров. Баки и крышки современных свинцовых аккумуляторов изготавливаются в основном из полипропилена, хотя отдельные разработчики признают преимущества сополимера пропилен с этиленом, обладающего очень хорошей механической прочностью.

Раньше для тяги изготавливались отдельные аккумуляторы, которые затем собирались в батарею. В последние годы большое количество работ направлено на усовершенствование моноблочной конструкции свинцовых батарей, позволяющей повысить удельные весовые параметры.

Наряду со свинцово-кислотными аккумуляторами некоторое применение на электромобилях находят также щелочные никель-железные аккумуляторы.

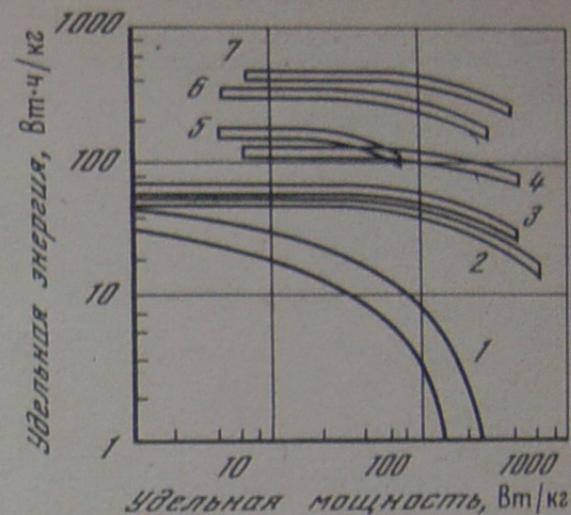
По конструктивному исполнению электродов никель-железные аккумуляторы, выпускаемые для тяги, бывают: с ламельными положительными и отрицательными электродами, с трубчатыми положительными и отрицательными электродами, со спечеными (безламельными) электродами и таблеточные. Более прогрессивными конструкциями в настоящее время являются безламельная и таблеточная, которые позволяют примерно в 1,5 раза улучшать весовые параметры железо-никелевых аккумуляторных батарей. Безламельная конструкция электрода представляет собой спеченую металло-керамическую мелкопористую основу, на которую осаждается активная масса электрода. В настоящее время безламельная конструкция никелевого электрода является очень дорогой, поскольку, кроме сложной технологии изготовления, увеличивается расход никеля (в 4–6 раз), который в этом случае идет на изготовление основы пластины.

Кроме свинцовых и никель-железных аккумуляторов, в последние годы на опытных электромобилях применялись и другие типы. Однако из них промышленное производство имеют только кадмиево-никелевые и серебряно-цинковые аккумуляторы, которые ввиду высокой стоимости и дефицитности применяемых материалов для электромобилей неперспективны. Другие типы аккумуляторов еще не имеют отработанных конструкций для целей тяги. Описание принципиальных схем и конструкций опытных образцов новых типов аккумуляторов, перспективных для электромобилей, дано в работах [4, 5, 11], а возможные значения основных параметров наиболее известных и перспективных систем были даны выше в табл. 8. Дополнительно к данным таблицы на рис. 12 приведены зависимости удельной энергоемкости от удельной мощности для различных типов аккумуляторов.

Для правильного понимания особенностей конструкции электромобилей и расчета их основных параметров необходимо, помимо уже названных

Рис. 12. Удельные энергетические характеристики химических источников тока:

1 — свинцовые аккумуляторы; 2 — никелево-кадмиевые; 3 — никелево-цинковые; 4 — серебряно-цинковые; 5 — воздушно-цинковые; 6 — натрий-серные; 7 — литий-хлорные



параметров аккумуляторов, рассмотреть также их электрические и экономические характеристики: напряжение, емкость по току, энергоемкость, КПД, срок службы и стоимость.

Напряжение аккумулятора, как и всякое напряжение электрического поля, характеризуется разностью потенциалов, в данном случае — между положительными и отрицательными электродами. Абсолютную величину электродного потенциала измерить невозможно. Поэтому измеряют всегда относительный электродный потенциал, т.е. разность электродных потенциалов двух электродов. При этом электродный потенциал так называемого нормального водородного электрода по соглашению принимается равным нулю. Значения нормальных потенциалов некоторых электродов относительно нормального водородного при комнатной температуре приведены в табл. 9.

Так как природа положительного и отрицательного электродов одного аккумулятора неодинакова, то их потенциалы различны и между электродами возникает разность потенциалов, или электродвижущая сила — ЭДС. Так, пользуясь данными табл. 9, получим, что ЭДС электрохимической пары Na—Cl равна  $2,71 + 1,36 = 4,07$  В, а пары Zn—Cl уже только 2,12 В. В результате ЭДС аккумулятора зависит прежде всего от типа электрохимической пары электродов. В меньшей степени на ЭДС влияют концентрация электролита, модификации окислителя и восстановителя. Значения ЭДС для обычных типов аккумуляторов и ряда перспективных систем приведены в табл. 10.

При замыкании электродов аккумулятора на определенную нагрузку разность потенциалов (напряжение) между ними становится меньше ЭДС. Это явление частично вызвано омическим падением потенциала внутри аккумулятора, а частично изменением потенциалов электродов при прохождении тока, так называемой поляризацией. Как омическое падение напряжения, так и поляризация электродов зависят от силы протекающего в цепи тока, температуры, времени работы (степени разряда) аккумулятора, конструкции и материала электродов и др.

Зависимость напряжения между электродами аккумулятора от времени разряда, представленная графически, называется разрядной кривой. Типичные разрядные кривые аккумулятора (разряд при постоянной силе тока) показаны на рис. 13. Поскольку разряд осуществляется постоянной силой тока, то для каждой разрядной кривой время разряда прямо пропорционально отдаваемой емкости по току.

Практически разряд аккумулятора можно вести только до определенного конечного напряжения, разряд ниже которого приводит к порче аккумулятора.

Как видно из графика, напряжение аккумулятора зависит от степени разряда, которая при одной и той же силе разрядного тока эквивалентна

Таблица 9

Нормальные потенциалы электродов ( $\epsilon^\circ$ )

| Электродный процесс                               | $\epsilon^\circ$ , В | Электродный процесс                               | $\epsilon^\circ$ , В |
|---|----------------------|---|----------------------|
| $\text{Na} \rightarrow \text{Na}^+ + \bar{e}$     | -2,71                | $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\bar{e}$   | 0,00                 |
| $\text{Mg} \rightarrow \text{Mg}^{2+} + 2\bar{e}$ | -2,37                | $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\bar{e}$ | +0,33                |
| $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\bar{e}$ | -0,76                | $\text{Ag} \rightarrow \text{Ag}^+ + \bar{e}$     | +0,80                |
| $\text{Ni} \rightarrow \text{Ni}^{2+} + 2\bar{e}$ | -0,24                | $2\text{Cl} \rightarrow \text{Cl}_2 + 2\bar{e}$   | +1,36                |

Таблица 10

## ЭДС различных типов аккумуляторов

| Тип аккумулятора   | ЭДС, В | Тип аккумулятора  | ЭДС, В |
|--------------------|--------|-------------------|--------|
| Свинцовый          | 2,1    | Натрий-серный     | 2,1    |
| Никель-кадмиевый   | 1,36   | Цинк-воздушный    | 1,3    |
| Никель-железный    | 1,40   | Железо-воздушный  | 0,9    |
| Никель-цинковый    | 1,7    | Никель-водородный | 1,4    |
| Серебряно-цинковый | 1,85   | Литий-хлорный     | 3,5    |

времени. Кроме того, рисунок показывает, что напряжение аккумулятора падает при возрастании силы разрядного тока. Типичные внешние характеристики аккумулятора, показывающие зависимость напряжения от силы тока и степени разряженности, показаны на рис. 14.

Тип и конструкция аккумулятора оказывают заметное влияние на его внешние характеристики.

В ряде работ были предложены эмпирические формулы для аналитического выражения разрядного напряжения аккумуляторов в зависимости от основных влияющих факторов, и прежде всего, от тока и времени разряда. В качестве примера приведено уравнение Шепарда для свинцовых аккумуляторов:

$$U_a = E_a - N I_p - k I_p \frac{Q_n}{Q_n - I_p \cdot t_p} - c I_p t_p, \text{ В} \quad (2.1)$$

где  $E_a$  — ЭДС аккумулятора, В;  $Q_n$  — номинальная емкость, А · ч;  $N$  — коэффициент, учитывающий внутреннее сопротивление аккумулятора;  $k$  — коэффициент, учитывающий поляризацию;  $c$  — коэффициент, учитывающий падение потенциала в процессе разряда из-за уменьшения плотности электролита.

Приведенная формула и другие известные аналогичные уравнения не выражают определенного физико-химического закона, а являются эмпирическими соотношениями, приближенно отражающими сложные зависимости, которые пока остаются не установленными. Как и всякие эмпирические формулы, известные выражения разрядного напряжения справедливы только в тех границах, для которых они составлены. Кроме этого основного недостатка известных методов расчета напряжения аккумуляторов, укажем на сложность уравнений, описывающих кривые. Поэтому использование аналитических выражений, описывающих кривые разряда, практически менее удобно, чем графиков.

Существенной для электромобиля является зависимость напряжения аккумулятора от температуры. Для всех типов общим является заметное

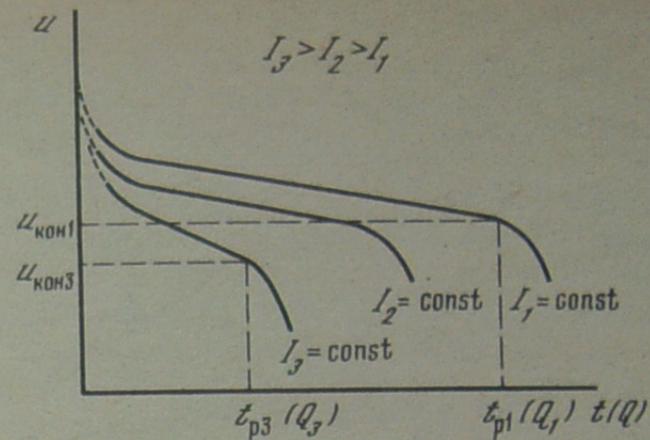


Рис. 13. Типичные кривые разряда аккумуляторов

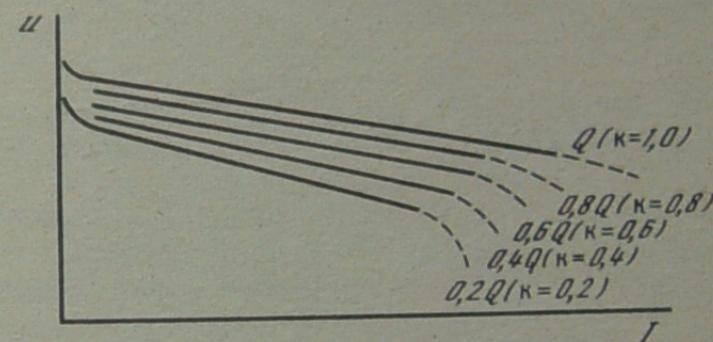


Рис. 14. Внешние характеристики аккумулятора

понижение напряжения аккумулятора для одного и того же разрядного тока при понижении температуры.

На электромобиле аккумуляторы собираются в батарею. ЭДС батареи определяется количеством последовательно соединенных аккумуляторов.

Для расчета напряжения батареи ( $U_b$ ), кроме действительного напряжения аккумуляторов ( $U_a$ ), зависящего от рассмотренных выше факторов, необходимо учесть также суммарное сопротивление соединительных перемычек ( $r_{пер}$ ):

$$U_b = b U_a - r_{пер} I, \text{ В} \quad (2.2)$$

где  $b$  — количество последовательно соединенных аккумуляторов.

Емкостью аккумулятора называется количество электричества (А · ч), которое он отдает в определенных условиях при разряде до конечного напряжения. В случае разряда постоянной силой тока

$$Q = I_p t_p, \text{ А} \cdot \text{ч} \quad (2.3)$$

В общем случае

$$Q = \int_0^{I_p} i_p dt, \text{ А} \cdot \text{ч} \quad (2.4)$$

Понятие номинальной емкости тяговых аккумуляторов неоднозначно. В большинстве случаев номинальная емкость соответствует 5-часовому режиму разряда и температуре  $+25^\circ\text{C}$ . Однако для различных типов аккумуляторов могут быть отклонения.

Емкость каждого аккумулятора меняется в зависимости от ряда факторов, основными из которых являются сила разрядного тока и температура электролита.

Зависимость изменения номинальной емкости аккумулятора ( $Q_H$ ) от тока разряда ( $I_p$ ) в пределах режимов, характерных для работы аккумуляторов на автомобиле, с достаточной точностью описывается эмпирической формулой Пейкерта:

$$Q = Q_H (I_H / I_p)^{n-1}, \text{ А} \cdot \text{ч}, \quad (2.5)$$

где  $n$  — постоянная, определяемая опытным путем;  $I_H$  — сила тока при номинальной емкости, А · ч.

Для современных тяговых аккумуляторов значения коэффициента  $n$  можно принимать следующими: для кислотных намазных — 1,3; для кислотных панцирных — 1,32; для никель-железных с безламельным отрицательным электродом или таблеточных — 1,1–1,12; для никель-кадмиевых — 1,05–1,08.

Изменение емкости аккумуляторов от температуры  $\tau$  учитывается с помощью следующего уравнения:

$$Q = Q_H [1 + \alpha_\tau (\tau - 25)], \text{ А} \cdot \text{ч}. \quad (2.6)$$

Температурный коэффициент емкости  $\alpha_\tau$  определяется опытным путем. Он различен для каждого типа и конструкции аккумуляторов. Часто для аккумулятора указывается одно значение  $\alpha_\tau$ , что в большинстве случаев вполне достаточно для практических расчетов. Однако следует все же указать, что в действительности температурный коэффициент емкости увеличивается с ростом разрядного тока и с понижением температуры.

Для более точного определения емкости аккумулятора в зависимости от разрядных токов и температуры электролита рекомендуется пользоваться специальными номограммами.

Энергоемкость аккумулятора характеризуется количеством электрической энергии  $W$ , которое может быть практически от него получено в процессе разряда. В общем виде энергоемкость выражается так:

$$W = \int_0^{t_p} U I_p dt, \text{ Вт} \cdot \text{ч}. \quad (2.7)$$

Из уравнения (2.7) следует, что на энергоемкость влияют те же факторы, что и на напряжение и емкость по току. Причем влияние этих факторов более сложное, так как они накладываются друг на друга.

Номинальная энергоемкость  $W_H$  определяется в тех же условиях, что и номинальная емкость по току.

Зависимость энергоемкости от тока разряда описывается уравнением типа

$$W = W_H (I_H / I_p)^\beta, \text{ Вт} \cdot \text{ч}, \quad (2.8)$$

где  $\beta$  — постоянная для данного аккумулятора, несколько превышающая значение  $(n-1)$  в формуле Пейкерта.

Для различных аккумуляторов удобно сравнивать удельную энергоемкость, т.е. энергоемкость, приходящуюся на единицу массы. Особенно важным является параметр удельной энергоемкости для аккумуляторных батарей.

Следует обратить внимание на то, что удельная энергоемкость батареи существенно зависит, для одного и того же типа аккумуляторов, от емкости аккумуляторов, из которых собирается батарея.

Емкость по току аккумуляторов, применяемых для автомобилей, в основном находится в пределах 80–400 А · ч. При этом удельная энергоемкость батареи, составленной из аккумуляторов одного и того же

типа, при применении аккумуляторов большой емкости по току будет значительно (до 30%) выше, чем при использовании аккумуляторов небольшой емкости. Из этого следует вывод, что для реализации большей энергоемкости батареи следует применять аккумуляторы большей емкости по току. При этом при той же энергоемкости батареи ее напряжение получается меньшим, т.е. требуется меньшее количество аккумуляторов. Последнее ведет также к уменьшению стоимости и трудоемкости обслуживания батареи. Однако низкое напряжение батареи обуславливает высокие значения рабочих токов, что увеличивает стоимость тягового электрооборудования.

КПД аккумулятора определяется отношением количества энергии, отдаваемого при разряде, к количеству энергии, потребляемой аккумулятором при заряде:

$$\eta = \frac{\int_0^{t_p} u_p i_p dt}{\int_0^{t_3} u_3 i_3 dt}. \quad (2.9)$$

КПД современных тяговых аккумуляторов при нормальных режимах заряда и разряда находится в пределах 0,7–0,8. При разряде большими токами отдача аккумулятора по энергии уменьшается и соответственно снижается КПД, который в тяжелых условиях разряда может уменьшаться до 0,5.

При нормальном циклировании (разряд до 0,2 емкости, время разряда 5–10 ч, полный заряд, но без переразряда) современные аккумуляторы имеют следующий срок службы (в циклах): свинцовые намазные — 100–300, свинцовые панцирные — 1000–1800, никель-железные ламельные — 700–2000, никель-железные безламельные — 800–1500.

Стоимость аккумуляторов, как и всякой промышленной продукции, зависит от множества факторов, но определяющим все же является стоимость материала электродов. Анализ себестоимости производства аккумуляторов показывает, что в себестоимости современных свинцовых батарей удельный вес стоимости свинца составляет 49–55%, а в себестоимости никель-железных аккумуляторов стоимость никеля составляет 33–37% плюс 12–16%, приходящихся на стоимость углеродистой стали. Таким образом, стоимость активных материалов электродов составляет примерно 50% полной себестоимости аккумулятора.

Поскольку стоимость активных материалов электродов до некоторой степени позволяет судить о возможности стоимости аккумуляторов различных систем, то представляет интерес, исходя из возможных параметров различных элементов, сравнить удельную стоимость (на 1 кВт · ч энергоемкости) различных активных материалов электродов. Такое сравнение сделано в табл. 11.

Серийно выпускаемые отечественной промышленностью аккумуляторы имеют следующую удельную стоимость (руб./кВт · ч): свинцово-кислотные стартерные батареи — 22–32, щелочные железо-никелевые тяговые аккумуляторы — 30–45. Удельная стоимость зависит от емкости аккумуляторов: с увеличением емкости удельная стоимость уменьшается, что видно из данных табл. 12.

До сих пор речь шла об аккумуляторах, хотя на автомобиле используются не отдельные аккумуляторы, а батареи из них. Большое количество аккумуляторов, а батареи из них. Большое количество аккумуляторов, а батареи из них. Большое количество аккумуляторов, а батареи из них.

Таблица 11

Удельная стоимость активных материалов различных типов

| Материал | Удельный расход материала, кг/кВт·ч | Стоимость материала, руб/кг | Удельная стоимость активного материала, руб/кВт·ч | Тип аккумулятора                     |
|----------|-------------------------------------|-----------------------------|---|--------------------------------------|
| Свинец   | 16–20                               | 0,62                        | 9,9–12,4  | Свинцовые                            |
| Цинк     | 2,5–3,0                             | 2,1                         | 5,3–6,3   | Никель-цинковые<br>Воздушно-цинковые |
| Кадмий   | 1,0                                 | 10–35                       | 10–35   | Никель-кадмиевые                     |
| Никель   | 2,5                                 | 3,9–4,1                     | 9,8–10,3  | Никель-железные                      |
| Натрий   | 3,0                                 | 2,5–2,7                     | 7,5–8,1   | Натрий-серные                        |
| Литий    | 0,1                                 | 40–45                       | 4–4,5   | Литий-хлорные                        |
| Серебро  | 2,5–3,0                             | 239                         | 598–717   | Серебряно-цинковые                   |

Таблица 12

Стоимость аккумуляторов различной емкости

| Тип                                   | Емкость, А·ч | Удельная стоимость, руб/кВт·ч |
|---------------------------------------|--------------|-------------------------------|
| Свинцово-кислотные стартерные батареи |              |                               |
| 6ТСТ-50ЭМС                            | 50           | 32,0                          |
| 6СТ-60ЭМ                              | 60           | 23,6                          |
| 6СТ-75ЭМ                              | 75           | 22,4                          |
| Щелочные тяговые аккумуляторы         |              |                               |
| ТНЖ-350                               | 350          | 43,5                          |
| ТНЖ-400                               | 400          | 38,4                          |
| ТНЖ-500                               | 500          | 31,8                          |

чество опытных разработок электромобилей при практическом отсутствии их серийного производства обусловило тот факт, что до сих пор важнейшие параметры (в первую очередь величина напряжения) и конструктивные схемы построения аккумуляторных батарей электромобилей не стандартизованы.

Дальнейшее развитие электромобилей требует в первую очередь стандартизации ряда напряжений аккумуляторных батарей, без чего невозможно создание разветвленной сети станций по зарядке и подзарядке аккумуляторных батарей электромобилей в эксплуатации. В качестве основы напряжений следует, вероятно, использовать ряд напряжений выпускаемых в Советском Союзе тяговых аккумуляторных батарей для напольного электротранспорта (электрокары, электропогрузчики): 24, 30, 32, 40, 50, 80, 120, 160 В. Международной электротехнической комиссией (МЭК) создан технический комитет "Электромобили", которым рекомендован следующий ряд напряжений аккумуляторных батарей для электромобилей: 48, 60, 120, 180, 240 и 360 В.

В настоящее время аккумуляторная батарея электромобиля часто представляет собой сложный энергетический комплекс, обеспечивающий целый ряд эксплуатационных преимуществ: простоту обслуживания вплоть до полного исключения операции доливки электролита, увеличе-

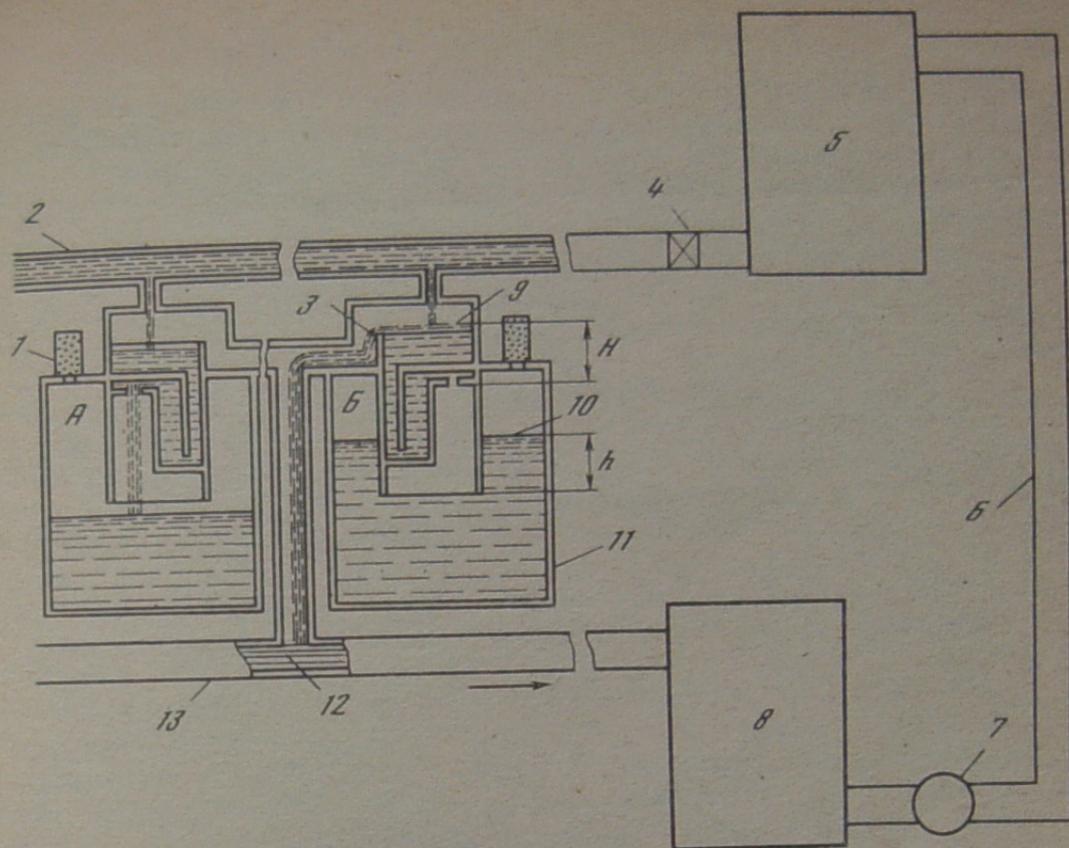


Рис. 15. Принципиальная схема централизованной доливки воды

А — момент доливки воды; Б — положение после достижения необходимого уровня электролита; 1 — взрывобезопасное вентиляционное устройство, исключающее разбрызгивание электролита; 2 — водоподводящий патрубком; 3 — водостойник; 4 — вентиль; 5 — водяной бак; 6 — патрубком водяного насоса; 7 — водяной насос; 8 — сливной бак; 9 — фиксированный уровень; 10 — уровень электролита; 11 — аккумуляторный элемент; 12 — избыточная вода; 13 — отвод избыточной воды

ние срока службы путем применения приборов контроля степени разряда, обеспечения оптимального температурного режима работы батареи и т.д.

Широкое признание на электромобильных аккумуляторных батареях нашла централизованная (часто автоматическая) доливка электролита. На рис. 15 показана принципиальная схема централизованной доливки.

Примером современного решения является батарея фирмы "Варта" (ФРГ), созданная для электробуса. Батарея имеет комплексную автоматизированную систему, улавливающую пары воды и газы. Пары воды конденсируются и возвращаются в аккумуляторы. Газы с помощью катализатора также превращаются в воду и возвращаются в аккумуляторы. Поэтому аккумуляторы совершенно герметичны, и благодаря этому появилась возможность использовать медь для межаккумуляторных соединений. Последнее уменьшает внутреннее сопротивление батарей и соответственно увеличивает ее полезную энергоемкость. Аккумуляторы батареи охлаждаются водой.

Вопросу поддержания температурного режима тяговой батареи уделяется все большее внимание. Помимо водяного охлаждения, широко применяется воздушное принудительное охлаждение.

## 2.2. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Электрохимический генератор, который осуществляет прямое преобразование химической энергии топлива (водород, гидразин, метанол и другие углеводородные жидкие топлива) в электрическую энергию, называется также топливным элементом. Топливные элементы содержат электроды, погруженные в электролит. Процесс преобразования энергии состоит из двух одновременно протекающих реакций: реакции окисления топлива на аноде и реакции восстановления окислителя на катоде. Обе эти реакции происходят на различных уровнях потенциала, подчиняясь законам термодинамики.

Для работы топливных элементов необходимо обеспечить постоянную подачу к его электродам топлива и окислителя, которые могут храниться вне элемента. Последнее является большим преимуществом топливных элементов перед существующими аккумуляторами, так как они (топливные элементы) могут работать сколько угодно долго, если будет обеспечен непрерывный подвод реагентов и отвод продуктов реакции. Это обеспечивает при длительной работе высокие значения удельной энергоемкости, значительно превышающие таковые для самых лучших современных аккумуляторов.

В настоящее время наибольшие успехи достигнуты в области водородно-кислородных топливных элементов со щелочным электролитом. Реакция электрохимического окисления водорода осуществляется, как правило, на пористых газодиффузионных электродах из никеля. Для увеличения скорости реакции в электрод добавляют катализатор — скелетный никель (никель Ренея), иногда платиновую чернь. Во второй электрод, на котором происходит восстановление кислорода, добавляют дисперсное серебро или активированный уголь. С этими катализаторами при рабочих температурах 60–90 °С удается получить плотности тока 100–200 мА/см<sup>2</sup>. Толщина таких электродов, которая раньше составляла 5–8 мм, в настоящее время снижена до 0,5–2 мм, что дает возможность создания очень компактных конструкций. Помимо блока собственно топливных элементов с водородными и кислородными электродами, энергетическая установка включает много вспомогательных механизмов (рис. 16).

Основные показатели электрохимических генераторов — удельная мощность на единицу веса и удельный расход компонентов. Для водородно-кислородных элементов достигнуты значения удельной мощности более 100 Вт/кг. Низкий эквивалентный вес водорода и кислорода объясняет малый удельный расход этих компонентов на единицу вырабатываемой электроэнергии (около 0,06 кг/кВт·ч водорода и 0,5 кг/кВт·ч кислорода). Однако значительное неудобство представляет большой вес баллонов для хранения водорода и кислорода.

В табл. 13 приведены некоторые характеристики гидридов и водорода как топлива для транспорта (гидриды представляют собой соединения ряда элементов, способные поглощать значительные количества водорода и выделять его при небольшом нагревании). В настоящее время наиболее перспективными для автомобильного транспорта считаются гидриды систем сплавов магния и железо-титановые.

Используя данные табл. 13, рассчитали характеристики топливных систем автомобиля и электромобилей на топливных элементах с запасом горючего на 418 км (полная масса во всех случаях одинакова, КПД топливных элементов в 2–2,5 раза выше КПД бензинового двигателя). Результаты расчета приведены в табл. 14.

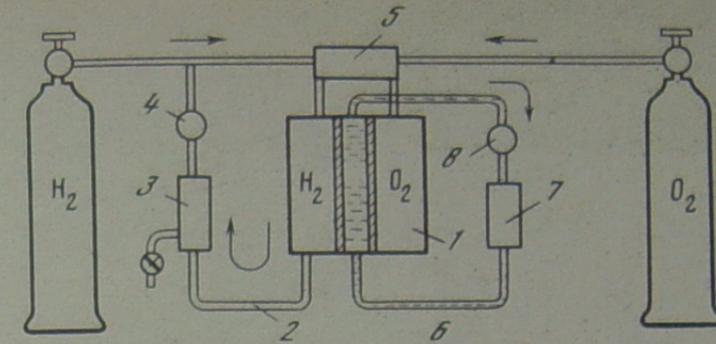


Рис. 16. Установка с водородно-кислородными топливными элементами

1 — топливные элементы; 2 — контур циркуляции водорода для удаления продукта реакции — водяного пара; 3 — конденсатор водяного пара; 4 — насос для водорода; 5 — блок регулировки подачи газов; 6 — контур циркуляции электролита для отвода тепла; 7 — холодильник; 8 — насос для электролита

Как видно из табл. 14, использование гидридов или жидкого водорода ведет к незначительному увеличению массы топливной системы.

Система с жидким водородом более отработана. Однако гидриды являются более предпочтительным видом хранения для наземного транспорта, прежде всего ввиду простоты в обращении и большей безопасности.

Основными характеристиками топливных элементов являются: мощность, КПД, напряжение, срок службы, стоимость. Тяговые электродвигатели электромобилей обычно характеризуются часовой мощностью. Для топливных элементов, не только при их применении на электромобиле, но

Таблица 13

Характеристики гидридов и водорода как топлива для транспорта

| Вещество                      | Содержание водорода    |                                   | Теплота горения |                     |
|-------------------------------|------------------------|-----------------------------------|-----------------|---------------------|
|                               | % массы                | г H <sub>2</sub> /см <sup>3</sup> | кал/г           | кал/см <sup>3</sup> |
| FeTiH <sub>1,95</sub>         | 1,7<br>(только гидрид) | 0,096                             | 593             | 3,245               |
| (Mg + 5% Ni)H <sub>1,85</sub> | 7,3<br>(только гидрид) | 0,125                             | 2 400           | 4270                |
| Водород под давлением 100 ат  | 1,0<br>(с учетом бака) | 0,007                             | 33 900          | 244                 |
| Жидкий водород                | 6,9<br>(с учетом бака) | 0,076                             | 33 900          | 2373                |
| Бензин                        | —                      | —                                 | 11 400          | 8024                |

Таблица 14

Масса топливных систем автомобиля и электромобилей на топливных элементах с запасом хода 418 км

| Компоненты систем | Автомобиль | Электромобиль  |                |               |
|-------------------|------------|----------------|----------------|---------------|
|                   | бензин     | сжатый водород | жидкий водород | гидрид магния |
| Топливо, кг       | 53,5       | 6,8            | 6,8            | 93            |
| Бак, кг           | 13,5       | 687            | 92             | 23            |
| Итого, кг         | 67,0       | 693,8          | 98,8           | 114           |

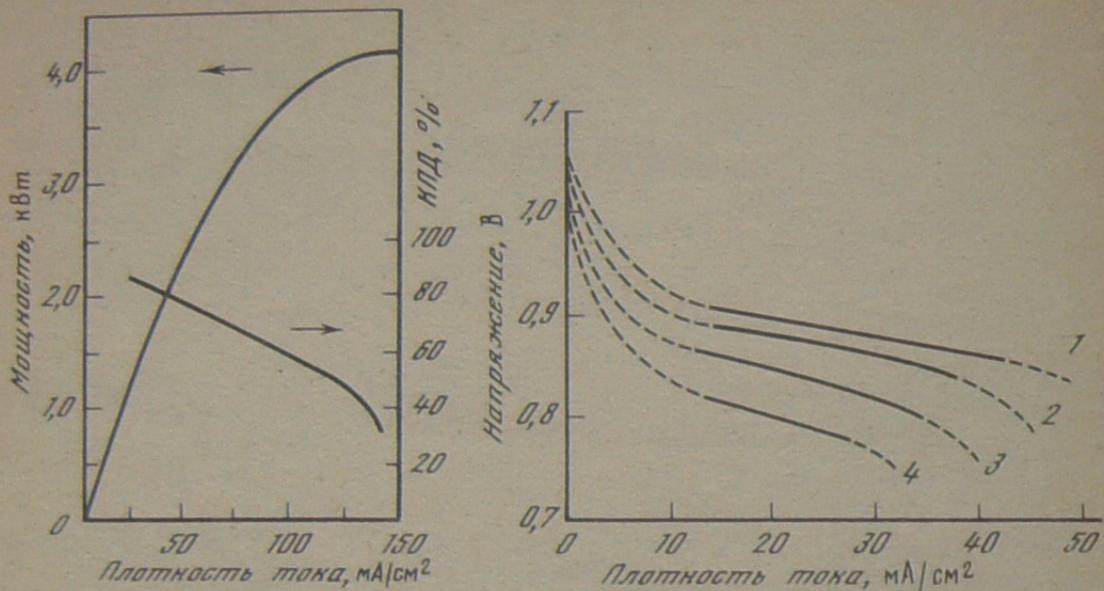


Рис. 17. Зависимость мощности и КПД батареи топливных элементов от нагрузки

Рис. 18. Вольт-амперные характеристики топливных элементов

1 — водородно-кислородный элемент при  $60^\circ\text{C}$  и атмосферном давлении; 2 — водородно-кислородный элемент при  $25^\circ\text{C}$  и атмосферном давлении; 3 — водородно-воздушный элемент при  $25^\circ\text{C}$  и атмосферном давлении; 4 — водородно-кислородный элемент при  $25^\circ\text{C}$  и давлении 100 мм рт. ст.

и для любого другого случая, критерии номинальной рабочей точки еще не определились. Поэтому мощность топливных элементов дается для разных режимов нагрузки, которая характеризуется плотностью тока на единицу поверхности электродов ( $\text{мА}/\text{см}^2$ ).

На рис. 17 дана зависимость выходной мощности батареи топливных элементов от плотности тока. График характеризует батарею топливных элементов с "номинальной" выходной мощностью 2,5 кВт, что соответствует плотности тока около  $50 \text{ мА}/\text{см}^2$ . Как видно из рисунка, мощность батареи может быть кратковременно повышена примерно на 60% (до 4,0 кВт). Большинство значений удельного веса батарей топливных элементов, приведенных в литературе, также относится к режимам работы, когда развиваемая мощность меньше максимальной на 30–60%.

КПД топливного элемента определяется отношением вырабатываемой электрической энергии к изменению свободной энергии. В первом приближении КПД измеряется в виде отношения действительного напряжения элемента к теоретическому значению ЭДС. Однако для сравнения с двигателем внутреннего сгорания используется КПД, определяемый отношением выработанной электрической энергии к теплотворной способности топлива. Для спиртов и углеводов разница между КПД, основанным на свободной энергии, и КПД, основанным на теплотворной способности, невелика — около 5%.

КПД топливного элемента меняется от нагрузки. На рис. 17 показана также зависимость КПД топливного элемента от плотности тока. Такой же характер зависимости КПД от нагрузки имеют все топливные элементы. Необходимо отметить, что в отличие от двигателей внутреннего сгорания КПД топливного элемента возрастает с уменьшением нагрузки.

Согласно общему положению электротехники генератор отдает свою максимальную мощность, когда сопротивление нагрузки снижает напряжение на клеммах элемента до 50% от значения ЭДС, т.е. при максималь-

Таблица 15

Основные характеристики воздушно-цинковых генераторов

| Фирма-разработчик | ЭДС, В | Рабочее напряжение, В | Уд. энергоемкость, Вт·ч/кг | Уд. мощность, Вт/кг | Срок службы, циклы    | Рабочая температура, $^\circ\text{C}$ |
|-------------------|--------|-----------------------|----------------------------|---------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| "Голф Дженерал"   | 1,6    | 1,0–1,3               | 100–200                    | 60–70               | 50                    | 70                                    |
| Атомик"           |        |                       |                            |                     |                       |                                       |
| "Леесона"         | 1,6    | 1,0–1,3               | 120                        | 40–50               | 50 (механич. зарядка) | 50                                    |
| "Сони"            | 1,6    | 0,8–1,3               | 65–100                     | 10–15               |                       | Окружающая среда                      |

ной мощности КПД топливного элемента примерно в 2 раза меньше, чем при малой нагрузке. В настоящее время при "номинальной" нагрузке КПД топливных элементов обычно составляет 60–70%, а при максимальной нагрузке — не более 40%.

Напряжение топливных элементов при возрастании нагрузки уменьшается. В качестве примера на рис. 18 показаны вольт-амперные характеристики топливных элементов. Как видно из рисунка, характер изменения напряжения аналогичен зависимости напряжения от тока для обычных аккумуляторов, только в случае топливных элементов состояние электродов в процессе работы не изменяется (нет зависимости напряжения от степени разряда). Данные рисунка также показывают влияние температуры на напряжение.

Срок службы топливных элементов в настоящее время достигает 5–10 тыс. ч, что даже превышает срок службы автомобильных бензиновых двигателей внутреннего сгорания. Ввиду отсутствия сильно нагруженных движущихся частей в принципе срок службы топливных элементов может быть весьма значительным.

Стоимость топливных элементов в настоящее время в несколько раз (5–15 раз) превышает стоимость автомобильных дизелей.

Доступность кислорода из атмосферы и создание катодов, способных эффективно его использовать, способствовали быстрому прогрессу в последние годы работ по созданию элементов системы металл-воздух. В этих элементах анод аккумуляторного типа работает с "воздушным" катодом типа, используемого в топливных элементах, т.е. здесь можно говорить о топливном полуэлементе.

Некоторые преимущества системы металл-воздух по сравнению с обычными батареями очевидны: катодный реактив имеется в неограниченном количестве в атмосфере, он бесплатен и не составляет ни веса, ни объема элемента. Кроме того, ряд металлов, которые могут быть использованы на аноде при "воздушном" катоде, имеет очень высокую теоретическую удельную энергоемкость, что указывает на возможность создания элементов системы металл-воздух с высокими параметрами.

Во время разряда элемента металл-воздух на аноде происходит растворение металла, а на катоде — восстановление кислорода атмосферы с образованием окиси металла.

При заряде происходит электролитическое осаждение металла и выделение газообразного кислорода, который свободно уходит в атмосферу. К сожалению, именно в этой фазе работы имеются большие затруднения,

вытекающие из нерастворимости окислов металлов, из возможного окисления и последующего пассивирования этих металлов и из тенденции металлов к осаждению в виде "дендритов".

В настоящее время наиболее изученной является система цинк—воздух, поскольку цинк является наиболее легким металлом, стабильным в водном растворе. Другими экспериментальными металлами являются железо, кадмий, алюминий, магний и др.

Первичные и запасные батареи системы цинк—воздух широко применяются со времени второй мировой войны в радиотехнике, системах проводочной связи, в военной технике и т.д. Наиболее известными разработками вторичных источников энергии (аккумуляторов) на базе системы цинк—воздух являются исследования фирм "Леесона" (США), "Галф Дженерал Атомик" (США) и "Сони" (Япония) [4, 12]. Их основные параметры приведены в табл. 15.

### 2.3. КОМБИНИРОВАННЫЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫЕ УСТАНОВКИ

Современные и даже перспективные в настоящее время аккумуляторные батареи по своей энергоемкости значительно уступают бензину. Удельный вес современных аккумуляторов примерно в 100 раз, а перспективных примерно в 10 раз больше, чем вес топлива, имеющего эквивалентный запас энергии. Поэтому в настоящее время ведутся большие работы по созданию электромобилей с комбинированной системой питания. Идея этой системы заключается в значительном уменьшении потребной энергоемкости (а следовательно, веса) аккумуляторной батареи за счет ее подзарядки от дополнительного энергоагрегата, обладающего высокой удельной энергоемкостью. Другими словами, ведутся работы по созданию для электромобиля комбинированной энергосиловой установки.

Наиболее широко исследуются системы, в которых для подзарядки используются двигатель-генераторные установки (на основе двигателей внутреннего сгорания), электрохимические генераторы и контактная сеть. Применительно к этим системам и рассмотрим совместную работу аккумуляторов и агрегата подзарядки.

При совместной (параллельной) работе нескольких источников электрической энергии общая нагрузка распределяется между ними в зависимости от электрических и механических характеристик агрегатов.

Рассмотрим вначале совместную работу аккумуляторной батареи с контактной сетью. Поскольку в этом случае напряжение контактной сети ( $U_c$ ) практически не меняется от режима работы электромобиля, то напряжение на сборных шинах ( $U$ ) можно выразить следующим образом:

$$U = U_c = U_B \approx n(E_a - I_a r_a), \text{ В}, \quad (2.10)$$

где  $n$  — число последовательно соединенных аккумуляторов;  $E_a$  — ЭДС аккумуляторов, В.

При  $U_c > nE_a$  уравнение (2.10) справедливо при условии, что ток аккумулятора ( $I_a$ ) будет иметь отрицательное значение, т.е. аккумулятор в этом случае будет заряжаться.

Более наглядно можно проследить совместную работу аккумуляторной батареи и контактной сети путем сопоставления их внешних характеристик, что сделано на рис. 19. Для простоты внешняя характеристика аккумулятора вблизи тока  $I_a = 0$  спрямлена. Фактически же она около этой точки имеет заметную кривизну за счет изменения сопротивления поляризации. Такое упрощение не отражается на рассуждениях: на всем диапазоне изменения нагрузки системы внешние характеристики пересекаются только в

Рис. 19. Внешние характеристики контактной сети и аккумуляторной батареи

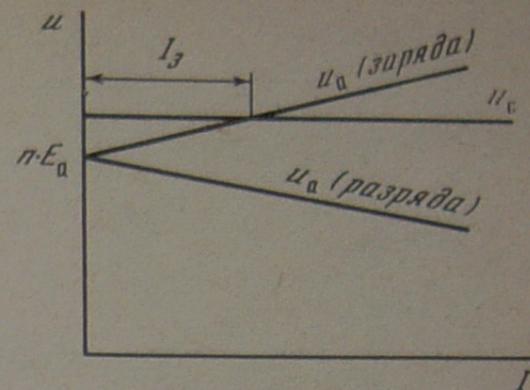
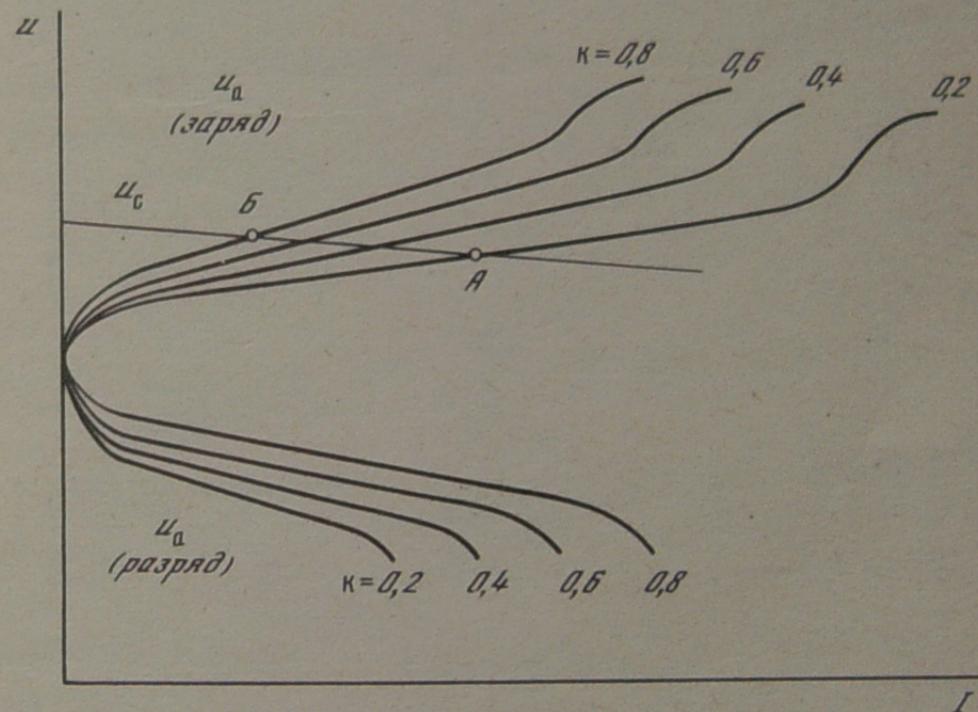


Рис. 20. Внешние характеристики контактной сети и аккумуляторной батареи при различной степени ее заряженности



одной точке. Это пересечение зарядной характеристики аккумуляторной батареи. Следовательно, на всем диапазоне изменения нагрузки системы ток аккумуляторной батареи является зарядным и равным в данном случае  $I_3$  (см. рис. 19).

Как уже отмечалось выше, параметры внешней характеристики аккумуляторов изменяются от степени разряженности батареи (ЭДС аккумуляторов падает, а сопротивление  $r_a$  растет с увеличением разряженности) и температуры электролита ( $r_a$  растет с понижением температуры). Влияние степени заряженности аккумуляторной батареи на совместную работу с сетью показано на рис. 20, где при разряженном состоянии аккумуляторов ток заряда, определяемый точкой пересечения характеристик (точка А), очень большой. По мере зарядки аккумулятора ток заряда уменьшается (например, при степени заряженности 0,8 величина тока заряда определяется абсциссой точки В).

При  $U_c > nE_a$  фактически имеет место процесс заряда аккумуляторной батареи при постоянном напряжении. При этой системе заряда напряжение заряда в течение всего времени заряда поддерживается постоянным и равным 2,5 В на элемент для свинцовых и 1,8 В на элемент для щелочных аккумуляторов. Зарядный ток, пропорциональный разности между напряжением заряда и электродвижущей силой батареи, вначале весьма велик, однако, по мере увеличения электродвижущей силы заряжаемой батареи,

Рис. 21. Последовательная схема электромобиля с комбинированным питанием  
 1 — двигатель внутреннего сгорания; 2 — генератор; 3 — система регулирования; 4 — тяговый электродвигатель; 5 — карданная передача; 6 — аккумуляторная батарея

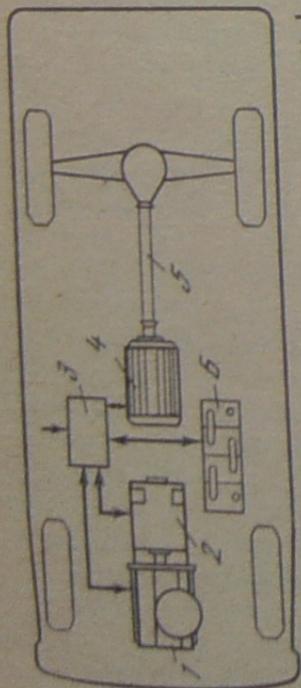
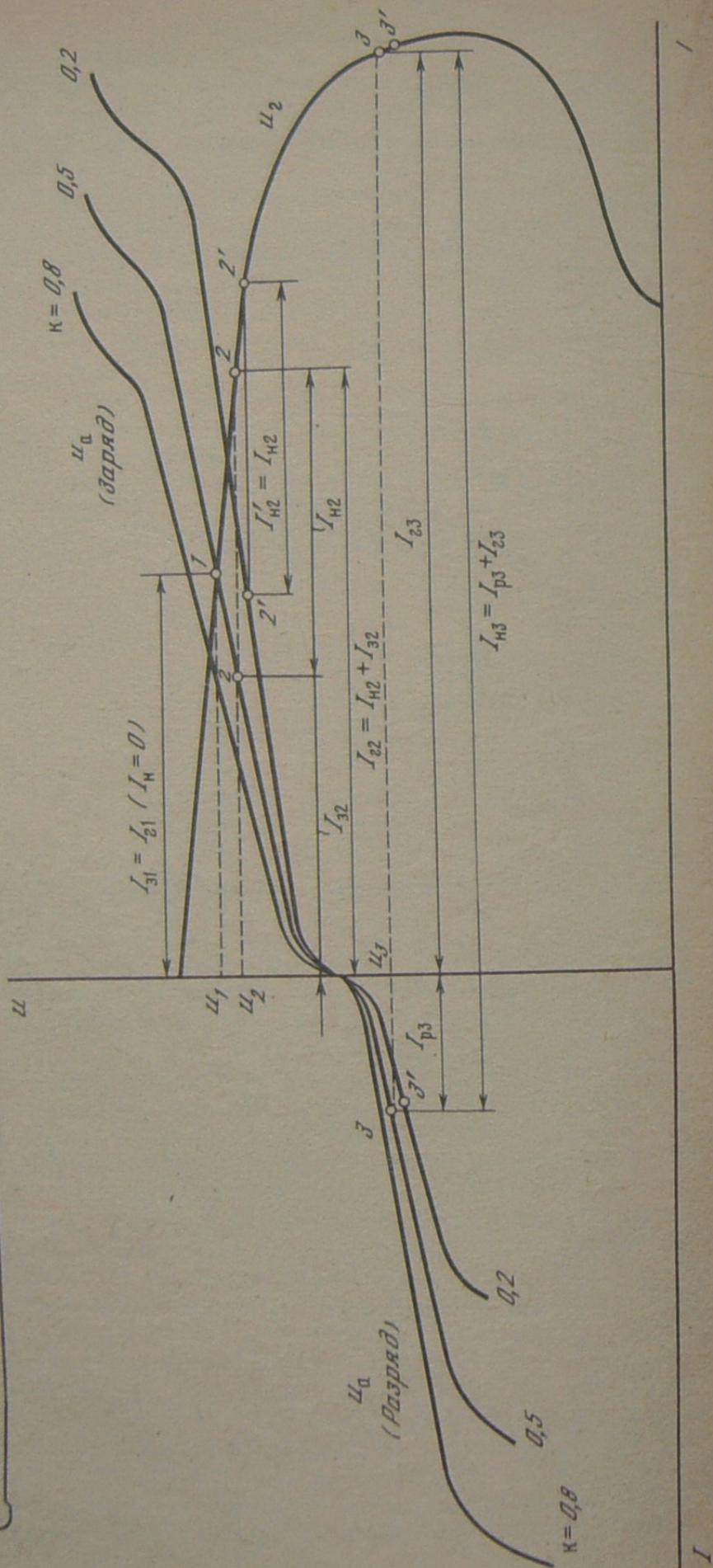


Рис. 22. Внешние характеристики генератора и аккумуляторной батареи



сила зарядного тока довольно быстро уменьшается. Прирост емкости  $\Delta q$ , выраженный в процентах, может быть с достаточной точностью вычислен по формуле Кулебакина, учитывающей зависимость прироста емкости от состояния заряжаемой батареи (характеризуется остаточной емкостью в процентах —  $q_{ост}$ ), температуры электролита  $T_3$  и продолжительности заряда  $t_3$ :

$$\Delta q = (30 - 0,17q_{ост}) \frac{25 + T_3}{50} \sqrt{t_3}, \% \quad (2.11)$$

Совместная работа аккумуляторной батареи и контактной сети является наиболее простым вариантом в смысле распределения токов. Гораздо более сложным является распределение токов при параллельной работе двигатель-генератора относительно небольшой мощности с аккумуляторной батареей.

В настоящее время различают так называемые последовательную и параллельную схемы комбинированного питания. Наиболее распространенной является последовательная схема (рис. 21). При этой схеме вся мощность двигателя используется для привода генератора. Вырабатываемый генератором ток идет на питание тягового электродвигателя и на подзарядку аккумуляторной батареи. Хотя схема называется последовательной, генератор и аккумуляторная батарея в ней включены параллельно. Для того чтобы выяснить распределение токов при параллельной работе генератора с аккумуляторной батареей, рассмотрим их характеристики, представленные на рис. 22.

Для удобства графических построений внешние разрядные характеристики аккумуляторной батареи повернуты относительно оси ординат на  $180^\circ$ , т.е. ток заряда батареи принят положительным, а ток разряда — отрицательным. Характеристика генератора изображена с учетом применения регулятора напряжения.

Для простоты вначале рассмотрим случай, когда батарея имеет степень разряженности 0,5.

Пусть напряжение на сборных шинах  $U = U_T = U_a$ , а нагрузка в сети равна нулю ( $I_H = 0$ ). Тогда при  $U_T > nE_A$  будет иметь место заряд аккумуляторной батареи. Сила зарядного тока в этом случае определяется абсциссой пересечения характеристик заряда батареи и генератора (точка 1). При этом ток нагрузки генератора равен току заряда батареи.

По мере увеличения тока нагрузки будет расти ток генератора, напряжение же на сборных шинах и ток заряда аккумуляторов будут уменьшаться. Так, если напряжение на сборных шинах становится равным  $U_2$ , то ток заряда (см. рис. 22) батареи оказывается равным  $I_{32} < I_3$ , а ток генератора  $I_{Г2}$  равен в этом случае сумме зарядного тока генератора и тока нагрузки.

При дальнейшем увеличении тока нагрузки ток генератора продолжает расти, а ток заряда аккумуляторов уменьшается, и при некотором напряжении на сборных шинах, равном сумме ЭДС аккумуляторов, ток заряда батареи становится равным нулю. В этом случае весь ток генератора идет на нагрузку.

При еще большем увеличении тока нагрузки ток аккумуляторной батареи меняет свой знак, т.е. батарея переходит в режим разряда. Ток нагрузки становится теперь равным не разности, а сумме токов генератора и аккумуляторной батареи (точка 3 на рис. 22).

Таким образом, рассмотрение внешних характеристик аккумуляторной батареи и генератора показывает, что по мере роста тока нагрузки генера-

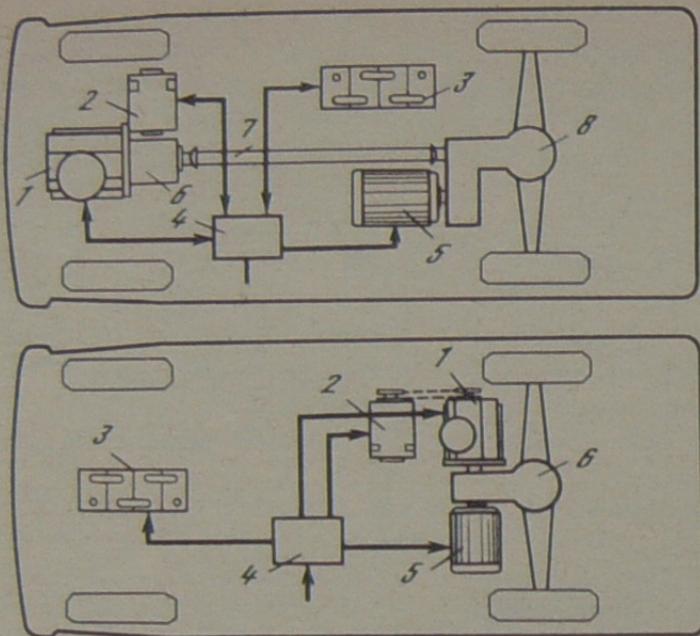


Рис. 23. Параллельные схемы электромобилей с комбинированным питанием  
 1 — двигатель внутреннего сгорания; 2 — генератор; 3 — аккумуляторная батарея; 4 — система регулирования; 5 — тяговый электродвигатель; 6 — планетарный механизм суммирования или разделения потоков мощности; 7 — карданная передача; 8 — трансмиссия

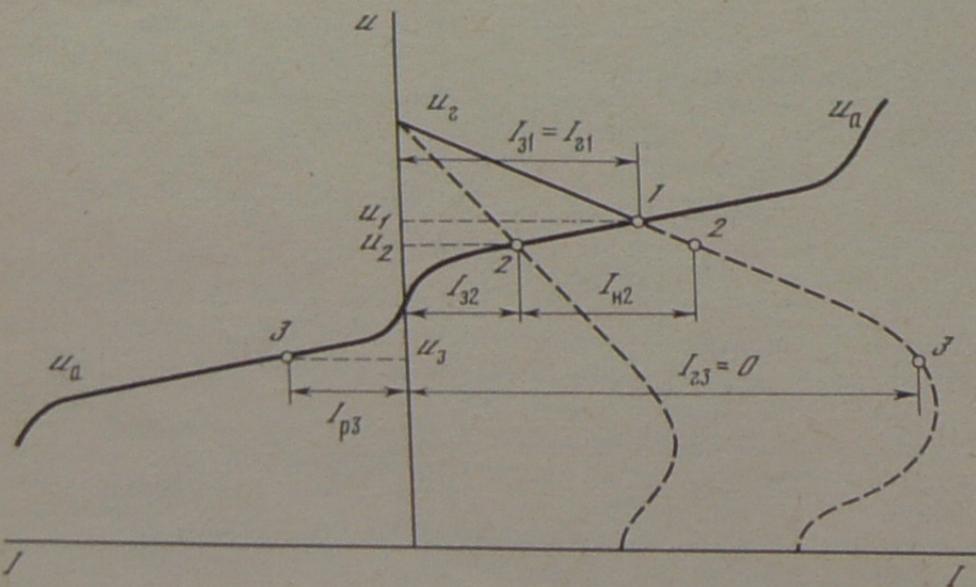


Рис. 24. Внешние характеристики генератора и аккумуляторной батареи при параллельной схеме электромобиля с комбинированным питанием

тор сначала начинает разгружаться от зарядного тока и все в большей мере отдавать ток во внешнюю цепь. При определенном значении тока нагрузки напряжение генератора становится равным сумме ЭДС аккумуляторов батареи, и ее заряд прекращается. При еще большем увеличении тока нагрузки напряжение в цепи становится меньше суммы ЭДС аккумуляторов, и батарея начинает разряжаться, как бы помогая генератору покрывать нагрузку во внешней цепи.

Влияние степени заряженности аккумуляторной батареи на распределение тока между генератором и батареей также видно из рассмотрения

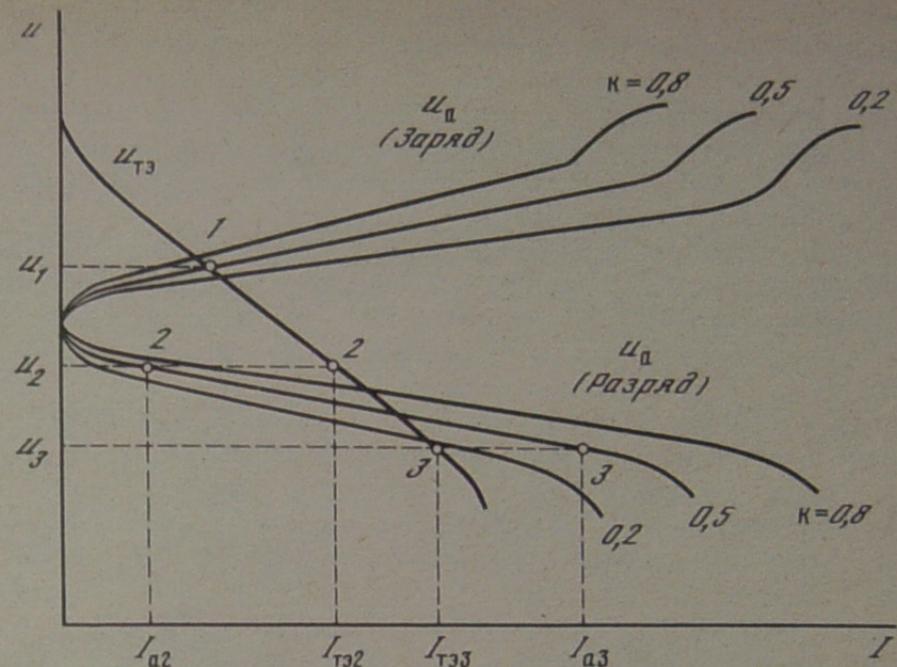


Рис. 25. Внешние характеристики батареи топливных элементов и аккумуляторной батареи

рис. 22 (точки с меньшей степенью заряженности отмечены цифрой со штрихом). Как видно из рис. 22, уменьшение степени заряженности ведет к росту токов заряда батареи и к уменьшению токов разряда при одинаковом токе нагрузки. Во всех случаях нагрузка генератора при меньшей степени заряженности батареи возрастает, а напряжение в цепи уменьшается.

При параллельных схемах комбинированного питания (рис. 23) лишь часть мощности двигателя идет на привод генератора, который подзаряжает тяговую аккумуляторную батарею. Другая часть мощности через механическую силовую передачу непосредственно идет на ведущие колеса. И в этой схеме генератор и батарея электрически работают параллельно. В идеальном случае совместная работа генератора и батареи на электромобиле с параллельной схемой комбинированного питания представлена на рис. 24.

Для простоты на рисунке изображена внешняя характеристика аккумуляторной батареи только для одного состояния степени заряженности.

Аналогично, как и в электромобиле с последовательной схемой комбинированного питания, когда внешней нагрузки нет, весь ток генератора идет на заряд батареи. Величина тока заряда определяется абсциссой точки пересечения зарядной характеристики батареи и внешней характеристики генератора (точка 1 на рис. 24).

При появлении внешней нагрузки часть мощности теплового двигателя, приводящего в действие генератор, через механическую передачу непосредственно используется для привода колес электромобиля. Следовательно, мощность генератора уменьшается и его характеристика будет уже другой ( $U_{Г2}$  на рис. 24). Точка 2 характеризует совместную работу батареи и генератора в этих условиях. Пунктиром на рисунке показана величина тока нагрузки (соответствующая последовательной схеме), на которую уменьшается общий ток генератора при переходе на параллельную схему комбинированного питания.

При большой внешней нагрузке вся мощность теплового двигателя передается на колеса электромобиля, а генератор при этом может быть полностью отключен. Дополнительно к мощности теплового двигателя при-

бавляется также мощность тягового электродвигателя, питаемого от аккумуляторной батареи. Этот режим работы характеризует точка 3.

Данные рис. 24 наглядно показывают, насколько (если знать режимы работы) уменьшается нагрузка генератора (а следовательно, его размеры, масса и стоимость) — пунктирная часть графика. Зная уменьшение нагрузки генератора, можно подсчитать количество энергии, на которое уменьшается двойное преобразование.

Совместную работу комбинированной энергосиловой установки, состоящей из батареи топливных элементов и аккумуляторной батареи, рассмотрим на примере рис. 25. Этот рисунок отличается от предыдущих тем, что здесь зарядные и разрядные характеристики расположены на одном графике.

Совместная работа аккумуляторов и топливных элементов при малых нагрузках (напряжение  $U_1$ ) и заряда аккумуляторов аналогична предыдущему рассмотрению работы генератора и аккумуляторной батареи.

При возрастании нагрузки напряжение в схеме падает, например, до  $U_2$ . В этом случае ток разряда топливных элементов —  $I_{ТЭ2}$ , а ток разряда аккумуляторов —  $I_{А2}$ . Ток нагрузки равен сумме тока разряда батареи топливных элементов и аккумуляторной батареи.

Таким образом, совместная работа батареи топливных элементов и аккумуляторной батареи полностью аналогична совместной работе двигателя-генератора и аккумуляторной батареи при последовательной схеме комбинированного питания.

## ГЛАВА 3

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УСТРОЙСТВА И РАСЧЕТА ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

#### 3.1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ДВИЖЕНИЯ

Движение автомобиля по дороге имеет сложный характер. В процессе движения между элементами автомобиля возникают внутренние взаимодействия и одновременно происходят внешние взаимодействия с окружающей средой. Полезное поступательное движение автомобиля неразрывно связано с вращением ведущих колес и деталей движущих механизмов. Кроме поступательного движения, имеется ряд добавочных движений, не участвующих в полезном перемещении автомобиля и проявляющихся большей частью в виде добавочных колебательных процессов. В данной работе излагаются только законы поступательного движения автомобиля.

На поступательное движение автомобиля влияют только те составляющие внешних сил, которые действуют в направлении его движения или в противоположном направлении.

Аналогично тяговому балансу автомобиля и для автомобиля справедливо уравнение

$$P_k = P_f + P_i + P_w + P_j, \text{ Н}, \quad (3.1)$$

где  $P_k$  — сила тяги, Н;  $P_f$  — сила сопротивления качению, Н;  $P_i$  — сила сопротивления подъему, Н;  $P_w$  — сила сопротивления воздуха, Н;  $P_j$  — сила инерции, Н.

Сила тяги создается тяговым электродвигателем и определяется по уравнению

$$P_k = (M_{in} i_0 \eta_{TP}) / r_k, \text{ Н}, \quad (3.2)$$

Значения передаточных чисел редуктора  $i_n$  и главной передачи  $i_0$  определяются в результате тяговых расчетов.

КПД трансмиссии  $\eta_{TP}$  характеризует механические потери, обусловливаемые трением в шестернях, подшипниках и сальниках трансмиссии. В практических расчетах автомобиля КПД всей трансмиссии может приниматься постоянным для всех передач. Учитывая это, и для электромобиля, имеет ли он коробку перемены передач или не имеет, значения КПД трансмиссии можно принимать одинаковыми и равными:

для легковых электромобилей — 0,90—0,92.

для грузовых электромобилей — 0,85—0,90.

Радиус качения колеса  $r_k$  принимается по результатам соответствующих испытаний. Приблизительно он может определяться по формуле

$$r_k = (0,5d + k_{ш}h) / 1000 \text{ мм}, \quad (3.3)$$

где  $d$  — диаметр обода колеса, мм;  $h$  — высота профиля шины, мм;  $k_{ш}$  — коэффициент деформации шины, составляющий для шин легковых автомобилей 0,86—0,88, а для шин грузовых автомобилей и автобусов — 0,89—0,91.

Сила сопротивления качению в общем случае может быть выражена в следующем виде:

$$P_f = fG \cos \alpha, \text{ Н}, \quad (3.4)$$

где  $G$  — вес электромобиля, Н;  $\alpha$  — продольный уклон дороги, град.

Коэффициент сопротивления качению  $f$  характеризует потери на перекачивание колеса. Этот коэффициент в основном зависит от конструкции шины, давления воздуха в шине, качества и состояния дороги. Кроме того, коэффициент сопротивления качению зависит от скорости и нагрузки, а также передаваемого крутящего момента.

У наземных безрельсовых транспортных средств шина является одним из основных элементов, обеспечивающих плавность хода и комфортабельность перевозок. Для обеспечения требуемой плавности хода при уменьшении полной массы транспортного средства требуется применение более эластичных шин, обеспечивающих большую деформацию при том же усилии. В результате, как правило, коэффициент сопротивления качению больше для автомобилей с меньшей полной массой. Так, например, для автобуса с полной массой порядка 16 т коэффициент сопротивления качению составляет около 0,009—0,010, в то время как для легкового автомобиля с полной массой около 1 т он составляет уже величину порядка 0,013—0,015.

С увеличением числа слоев каркаса шины и уменьшением угла расположения нитей корда, а также с улучшением материала понижаются гистерезисные потери, сопровождающие качение упругого колеса. Влияние конструкции шины на коэффициент сопротивления качению по асфальтобетонному покрытию, а также изменение ряда характеристик шины при этом дано в табл. 16.

Большое влияние на коэффициент сопротивления качению оказывают тип и состояние дорожного покрытия. Обусловлено это тем, что при качении колеса, кроме потерь в самой шине, имеют место невозвратные потери на деформацию грунта. Влияние типа и состояния дорожного покрытия на коэффициент сопротивления качению показано в табл. 17.

В случае движения по твердому покрытию, при снижении давления воздуха в шине, одновременно с улучшением плавности хода и сцепления

Таблица 16

Средние значения коэффициента сопротивления качению легкового автомобиля и изменение ряда характеристик шины (в баллах) в зависимости от конструкции

| Конструкция шины                   | Коэффициент сопротивления качению | Плавность хода | Износостойкость |
|------------------------------------|-----------------------------------|----------------|-----------------|
| Обычная 6,7X13                     | 0,013—0,015                       | 100            | 100             |
| С радиальным кордом                | 0,010—0,012                       | 80             | 175             |
| Специальная резиновая смесь        | 0,009—0,010                       | 80             | 140             |
| С уменьшенным упругим ходом        | 0,007                             | 75             | 140             |
| С малым отношением высоты к ширине | 0,006                             | 65             | 150             |

Таблица 17

Средние значения коэффициента сопротивления качению для различных типов дорожного покрытия

| Тип покрытия и его состояние  | Коэффициент сопротивления качению |
|---|-----------------------------------|
| Асфальтобетонное покрытие, находящееся в отличном состоянии   | 0,007—0,015                       |
| Асфальтобетонное покрытие в удовлетворительном состоянии  | 0,0012—0,020                      |
| Асфальтированные покрытия переходных типов (щебеночные, гравийные и др.) в ровном состоянии                                 | 0,015—0,030                       |
| Щебеночные, гравийные и булыжные покрытия, не обработанные вяжущими материалами, находящиеся в удовлетворительном состоянии | 0,025—0,032                       |
| Заснеженная дорога в укатанном состоянии  | 0,030—0,050                       |

колеса с дорогой повышается деформация шины, а следовательно, и коэффициент сопротивления качению.

При больших скоростях коэффициент сопротивления качению может весьма существенно возрастать. Однако для практических расчетов в интервалах скоростей движения электромобилей в городе коэффициент сопротивления качению может быть с достаточной точностью принят постоянной величиной.

Нужно также отметить, что по мере увеличения передаваемого через колесо крутящего момента растут тангенциальная деформация и поверхностное скольжение шины. Поэтому сопротивление качению ведущих колес на твердых поверхностях при прочих равных условиях несколько больше (примерно на 10—15%), чем ведомых. Учитывая, однако, что это различие невелико и часто компенсируется трением в подшипниках ведомых колес и другими факторами, обычно принимают значения коэффициентов сопротивления качению ведомых и ведущих колес равными.

Сила сопротивления подъему равна

$$P_1 = G_3 \sin \alpha, \text{ Н.} \quad (3.5)$$

Сила сопротивления воздуха движению выражается через конструктивные параметры электромобиля следующим образом:

$$P_w = (k_w F V^2) / 13, \text{ Н,} \quad (3.6)$$

где  $V$  — скорость движения, км/ч.

Таблица 18

Средние значения коэффициента обтекаемости для различных типов электромобилей

| Тип электромобиля                                | Коэффициент обтекаемости, $\frac{\text{Н} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^4}$ |
|--|--|
| Легковые   | 0,245—0,340  |
| Грузовые малой грузоподъемности на базе легковых | 0,290—0,340  |
| Грузовые с кузовом фургон                        | 0,370—0,440  |
| Грузовые с кузовом бортовая платформа            | 0,540—0,590  |
| Автобусы   | 0,410—0,490  |

Лобовая площадь электромобиля  $F$  приближенно определяется по формуле

$$F \approx k_F B_T H_T, \text{ м}^2, \quad (3.7)$$

где  $B_T$  — габаритная ширина электромобиля, м;  $H_T$  — габаритная высота, м;  $k_F$  — эмпирический коэффициент, который можно принимать для легковых электромобилей равным 0,8, для грузовых — 0,9.

Численные значения коэффициента обтекаемости  $k_F$ , характерные для электромобилей различных типов, приведены в табл. 18.

Сила инерции электромобиля определяется по формуле

$$P_j = \delta m_3 j, \text{ Н,} \quad (3.8)$$

где  $m_3$  — полная масса электромобиля, кг;  $j$  — ускорение, м/с<sup>2</sup>.

Коэффициент инерции вращающихся частей  $\delta$  в первую очередь зависит от моментов инерции колес автомобиля и вращающихся частей двигателя.

### 3.2. ТЯГОВАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

Для построения тяговой характеристики электромобиля (т.е. зависимости  $P_k = f(V)$ ) необходимо располагать механической характеристикой тягового электродвигателя, представляющей собой зависимость крутящего момента  $M$  от скорости вращения  $n$  и учитывающей особенности источника тока и влияние системы регулирования.

Характеристики электродвигателей строятся обычно в зависимости от силы тока  $I$ . Основными характеристиками являются кривые  $M = f(I)$  и  $n = f(I)$ . Используя эти зависимости, можно построить кривые мощности  $N = f(I)$ , коэффициенты полезного действия  $\eta = f(I)$  и механическую характеристику  $M = f(n)$ .

Рассмотрим сначала основные, так называемые естественные характеристики тяговых двигателей, т.е. зависимости  $M = f(n)$ ,  $n = f(I)$  и  $\eta = f(I)$  для случая, когда напряжение на клеммах электродвигателя постоянно, поскольку такие характеристики обычно и даются для двигателей.

Из теории электрических машин для двигателей постоянного тока вытекают следующие зависимости:

$$M = M_{3M} \pm \Delta M_n = C_M I_{\text{я}} B \pm \Delta M_n, \text{ Н} \cdot \text{м,} \quad (3.9)$$

$$n = (U \pm I_{\text{я}} r) / C_{\text{П}} B, \text{ об/мин,} \quad (3.10)$$

где  $M_{3M}$  — электромагнитный момент, Н · м;  $\Delta M_n$  — внутренний момент,

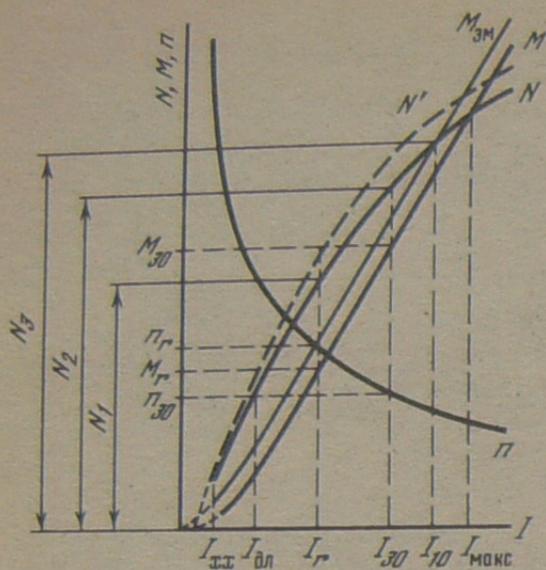


Рис. 26. Естественные характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением

$N_1$  — часовая мощность;  $N_2$  — 30-минутная мощность;  $N_3$  — 10-минутная мощность

обусловливаемый различными сопротивлениями,  $H \cdot m$ ;  $I_{я}$  — ток якоря, А;  $B$  — магнитный поток, Вб;  $U$  — напряжение, В;  $r$  — сопротивление, Ом;  $C_M$  и  $C_{II}$  — постоянные.

Знак "+" соответствует генераторному режиму, а знак "-" соответствует тяговому режиму.

В двигателях постоянного тока возможны следующие системы

возбуждения: последовательная, параллельная, смешанная при согласном и встречном включении обмоток возбуждения. Возможны и схемы с независимым возбуждением, при котором могут быть получены характеристики, соответствующие любой системе возбуждения.

На электромобилях применяются все возможные разновидности (по схеме возбуждения) двигателей постоянного тока. Однако на подавляющем большинстве электромобилей используется все же один тип двигателя с последовательным возбуждением.

Свойства и особенности двигателей постоянного тока с различными схемами возбуждения применительно к цепям тяги наземного транспорта хорошо изучены и рассмотрены в целом ряде работ [13, 14]. Однако условия работы тягового электродвигателя на электромобиле имеют свою особенность, которая заключается в том, что, как было показано в гл. 2, напряжение всех возможных источников тока для электромобилей в процессе работы меняется в зависимости от нагрузки, а для аккумуляторов еще в зависимости от его состояния (степени заряженности). При построении тяговой характеристики электромобиля необходимо учитывать эти особенности источников тока, применяемых на электромобилях.

Принципиальный подход к учету влияния особенностей источников тока на тяговую характеристику электромобиля один и тот же при различных типах возбуждения двигателей постоянного тока. Наибольший практический интерес представляет в настоящее время двигатель с последовательным возбуждением.

На рис. 26 изображены естественные характеристики двигателя с последовательным возбуждением.

Так как через якорь и обмотки возбуждения проходит один и тот же ток, то намагничивающая сила до насыщения полюсов пропорциональна току якоря. Поэтому с учетом формулы (3.9) крутящий момент двигателя с последовательным возбуждением можно представить в виде функции  $M = f(I^k)$ , где показатель  $k$  для ненасыщенных двигателей равен 2. Однако ненасыщенных машин в современной практике не строят. Поэтому практически показатель меняется с увеличением силы тока в пределах  $2 > k > 1$ .

Таким образом, при малых нагрузках крутящий момент растет пропорционально квадрату тока. При увеличении тока и насыщении магнит-

ной цепи двигателя кривая зависимости  $M = f(I)$  отклоняется от параболы и переходит в прямую. Важно также отметить, что с достаточной для практики точностью можно считать, что крутящий момент двигателя с последовательным возбуждением не зависит от напряжения.

Характеристика крутящего момента расположена несколько ниже характеристики электромагнитного вращающего момента и, как следует из формулы (3.9), отличается от нее на величину момента сопротивления, обусловливаемого магнитными и механическими потерями. Кривая крутящего момента не проходит через начало координат, а пересекает ось абсцисс при небольшом токе  $I_{хх}$ , соответствующем холостому ходу машины (см. рис. 26). Однако из-за чрезмерной скорости вращения двигателя работа в области малых токов недопустима.

С учетом формулы (3.10) и зависимости  $\Phi = f(I)$  можно получить следующие выражения для скоростей характеристики:

при ненасыщенных полюсах  $n = A/I - B$ .

при насыщенных  $n = A' - B' I$ ,

где  $A, A'$  и  $B, B'$  — постоянные.

Полученные зависимости показывают, что при малых токах, когда еще нет насыщения магнитной цепи двигателя, скорость вращения уменьшается приблизительно обратно пропорционально росту тока якоря. По мере насыщения магнитной цепи, имеющего место при больших токах, скорость снижается все менее значительно, как это показано на рис. 26, и приближается к линейной зависимости.

При небольших токах двигатель с последовательным возбуждением может развивать такую большую скорость вращения, которая будет опасна для прочности якоря.

На характеристике (рис. 26) отмечен также ток  $I_{макс}$ , устанавливающий предел работоспособности двигателей по условиям коммутации. Для тяговых электродвигателей работа при максимальном значении силы тока по условиям коммутации не вызывает механического повреждения двигателя.

Зависимость мощности двигателя от силы тока также показана на рис. 26. При определенном значении силы тока двигатель может работать сколь угодно долго. Это соответствует так называемой продолжительной мощности, которая, как видно из рис. 26, меньше значения часовой мощности. По условиям нагрева может быть также 30-, 20-, 10-минутная мощность. Однако наибольшие значения мощности определяются по условиям коммутации и могут быть получены от двигателя без вреда лишь в течение нескольких минут или секунд, так, чтобы нагрев электродвигателя за время перегрузки не смог превзойти допустимых норм.

Следует также иметь в виду, что величина тока еще не определяет однозначно мощность двигателя, так как при той же силе тока, но большем напряжении, мощность будет больше. Характеристика мощности двигателя при большем напряжении дана пунктиром на рис. 26, откуда следует, что при том же значении часовой силы тока значение мощности может измениться.

Значение мощности, определяемой по условию нагрева, в значительной мере зависит также от эффективности охлаждения. Очевидно, что при более интенсивном отводе тепла двигатель достигнет предельного перегрева в течение определенного времени (например, 1 ч) при работе с гораздо большей силой тока, чем двигатель с менее эффективным охлаждением, т. е., применив более эффективное охлаждение, можно с того же двигателя получить гораздо большую часовую мощность.

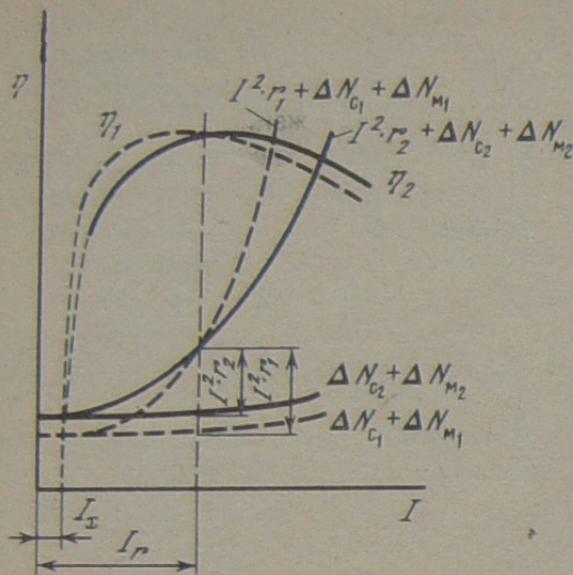


Рис. 27. Характеристики КПД двигателей, имеющих различные соотношения потерь

Таким образом, в отличие от двигателя внутреннего сгорания понятие мощности электродвигателя более сложно, чем для ДВС. Поэтому в тяговых расчетах наземного электротранспорта характеристика мощности тягового электродвигателя практически не применяется. Ее рассмотрение необходимо было для уточнения понятий мощности электродвигателя, которые требуются при выборе и расчете тягового двигателя.

Для двигателей последовательного возбуждения математически выразить естественные характеристики довольно сложно. Объясняется это тем, что поток полюсов у этих двигателей непостоянен и зависит не только от тока последовательной обмотки, являющегося общим с якорем, но и от магнитной системы, которая, насыщаясь, нарушает пропорциональность между потоком и током.

Имеется ряд эмпирических формул, дающих зависимость от тока. Однако результаты могут быть получены более точные, если пользоваться так называемыми универсальными естественными характеристиками, показывающими зависимости долевых значений тока (за единицу принимаются номинальные, т. е. часовые значения скорости, момента и тока).

КПД электрической машины при тяговом режиме равен отношению механической мощности к электрической и для двигателя с последовательным возбуждением определяется формулой.

$$\eta = \frac{N}{N_3} = 1 - (I^2 r + \Delta N_c + \Delta N_m) / uI. \quad (3.11)$$

В зависимости от соотношения, с одной стороны, электрических потерь ( $I^2 \cdot r$ ) и, с другой стороны, магнитных и механических потерь ( $\Delta N_c$  и  $\Delta N_m$ ) зависимость КПД от нагрузки имеет различный характер. На рис. 27 показаны характеристики КПД двух двигателей, имеющих одинаковые значения КПД при номинальном режиме.

Как видно из рис. 27, при небольших токах КПД стремится к нулю, так как в этом случае мощность, подводимая к двигателю, расходуется в основном на покрытие механических и магнитных потерь. По мере увеличения тока КПД быстро возрастает и при некоторой мощности достигает своего максимума. После достижения максимума кривая КПД постепенно снижается под влиянием быстрого увеличения электрических потерь, пропорциональных квадрату тока. Положение максимума на характеристике КПД зависит от соотношения между постоянными (механическими и магнитными) и переменными (электрическими) потерями в двигателе. Чем больше относительное значение постоянных потерь, тем при большем токе характеристика КПД достигает своего максимума. На рис. 27 характеристика первого двигателя соответствует двигателю с большими электрическими потерями, а характеристика второго — дви-

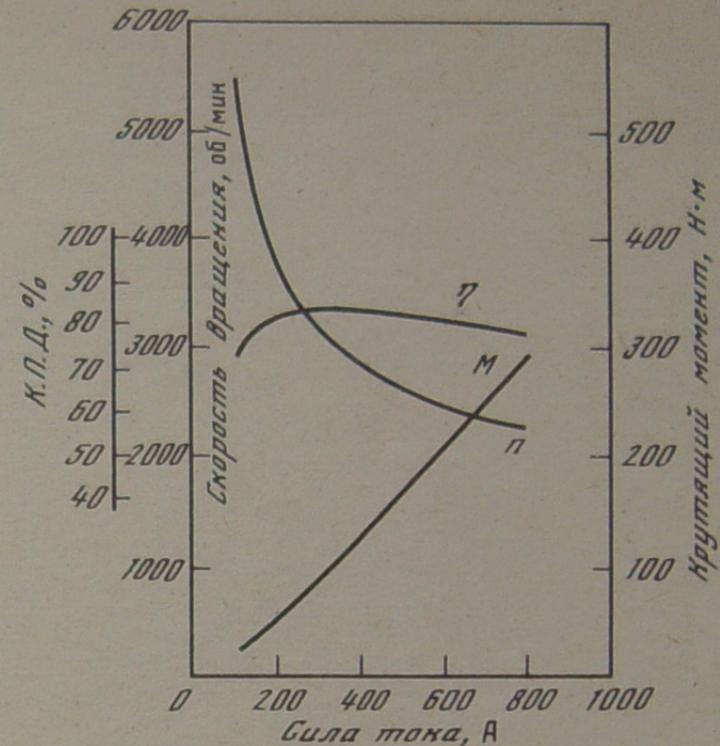


Рис. 28. Электромеханические характеристики тягового электродвигателя 3-ДТ-81

гателю с большими магнитными и механическими потерями. Для движения с частыми остановками и пусками, что характерно для электромобилей, более пригодна характеристика второго двигателя, поскольку он имеет меньшие потери при пуске, так как пусковой ток обычно больше часового.

На рис. 28 даны естественные электромеханические характеристики тягового электродвигателя 3-ДТ-81 с последовательным возбуждением, который применялся на отечественных электромобилях НИИАТ-А925. Номинальный ток двигателя — 230 А, максимальный ток — 690 А, максимальная скорость вращения — 5500 об/мин.

Чтобы перейти от естественных характеристик двигателя, соответствующих постоянному напряжению, к характеристикам, учитывающим зависимость напряжения источников тока, применяемых на электромобилях, обратимся опять к анализу исходных зависимостей (3.9), (3.10), (3.11).

Как уже отмечалось, для двигателя с последовательным возбуждением магнитный поток  $\Phi = f(I_я)$ . Следовательно, при постоянной силе тока якоря момент также постоянен, а скорость вращения пропорциональна напряжению.

Изменение напряжения оказывает определенное влияние на КПД двигателя. При изменении напряжения новое значение КПД можно определить, приняв приближенно, что сумма механических и магнитных потерь пропорциональна квадрату скорости вращения двигателя, а следовательно, и квадрату напряжения. Опуская промежуточные выкладки, новое значение КПД  $\eta_1$  определим по уравнению

$$\eta_1 = \eta - (1 - U_1/U) [I_я r (1/U + 1/U_1) - (1 - \eta)]. \quad (3.12)$$

При понижении напряжения КПД увеличивается в области малых нагрузок вследствие снижения механических и магнитных потерь и уменьшается при средних и больших нагрузках из-за увеличения удельного веса электрических потерь, абсолютное значение которых при данном токе не зависит от напряжения.

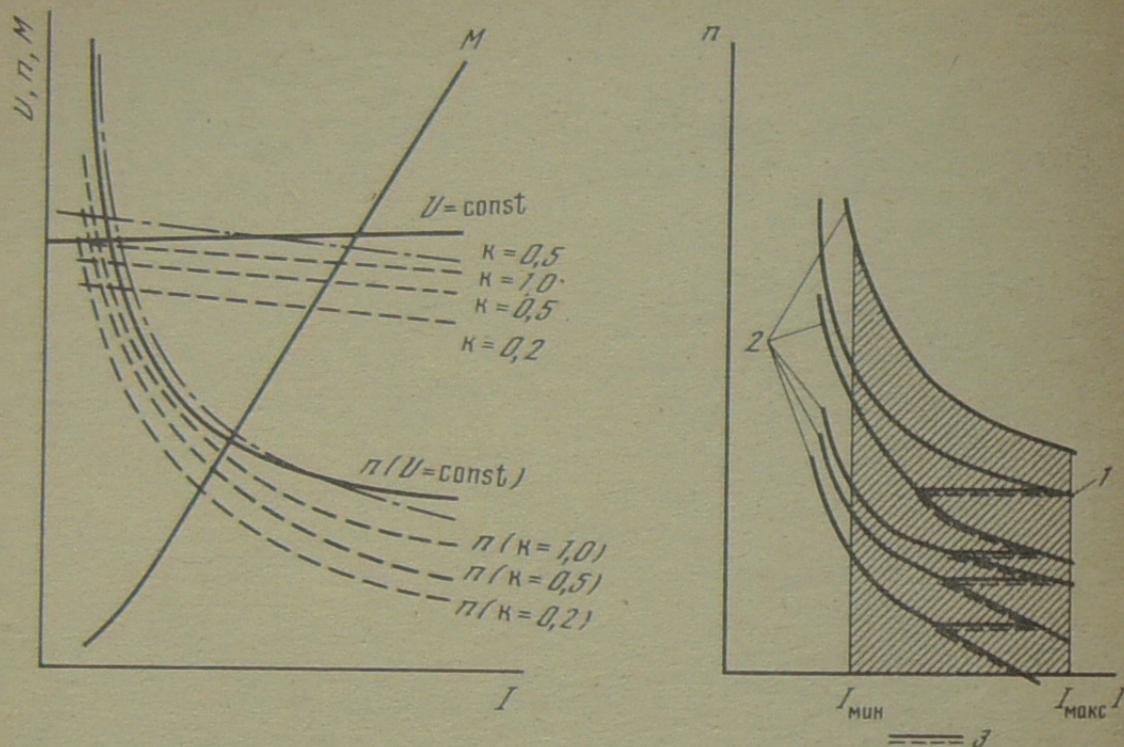


Рис. 29. Электромеханические характеристики двигателя с учетом изменения напряжения аккумуляторной батареи ( $k$  — степень заряженности батареи)

Рис. 30. Электромеханические характеристики двигателя при ступенчатом регулировании и зона рабочих точек при импульсном регулировании  
1 — естественная характеристика; 2 — искусственная характеристика; 3 — пуск двигателя

Учет влияния изменения напряжения на КПД двигателя необходим при изменении напряжения в несколько раз, что имеет место при регулировании. Что же касается внешних характеристик, то в пределах изменения напряжения применяемых на электромобилях источников энергии влиянием этого изменения на КПД двигателя можно пренебречь.

Для иллюстрации всего изложенного выше на рис. 29 показано влияние изменения напряжения аккумуляторной батареи на внешние характеристики тягового электродвигателя.

Как видно из рисунка, если номинальное напряжение батареи (т. е. напряжение полностью заряженной батареи при малой силе тока) равно номинальному напряжению двигателя, то различие скоростных характеристик при питании от аккумуляторной батареи и естественной характеристики весьма существенно. Чтобы лучше использовать двигатель, рекомендуется среднее напряжение батареи (т. е. при степени заряженности 0,5) при среднем токе нагрузки брать равным номинальному напряжению двигателя. Этот случай показан на рис. 29 штрихпунктирной линией.

Одна внешняя характеристика двигателя еще недостаточна для изучения тяговой динамики электромобиля. Необходимо дополнительно рассмотреть системы пуска и регулирования скорости, так как в условиях эксплуатации эти системы в значительной мере определяют динамические и экономические (расход энергии) качества электромобиля. Фактически пуск и регулирование скорости осуществляются одним и тем же устройством, и водитель электромобиля имеет один орган управления пуском и регулированием скорости.

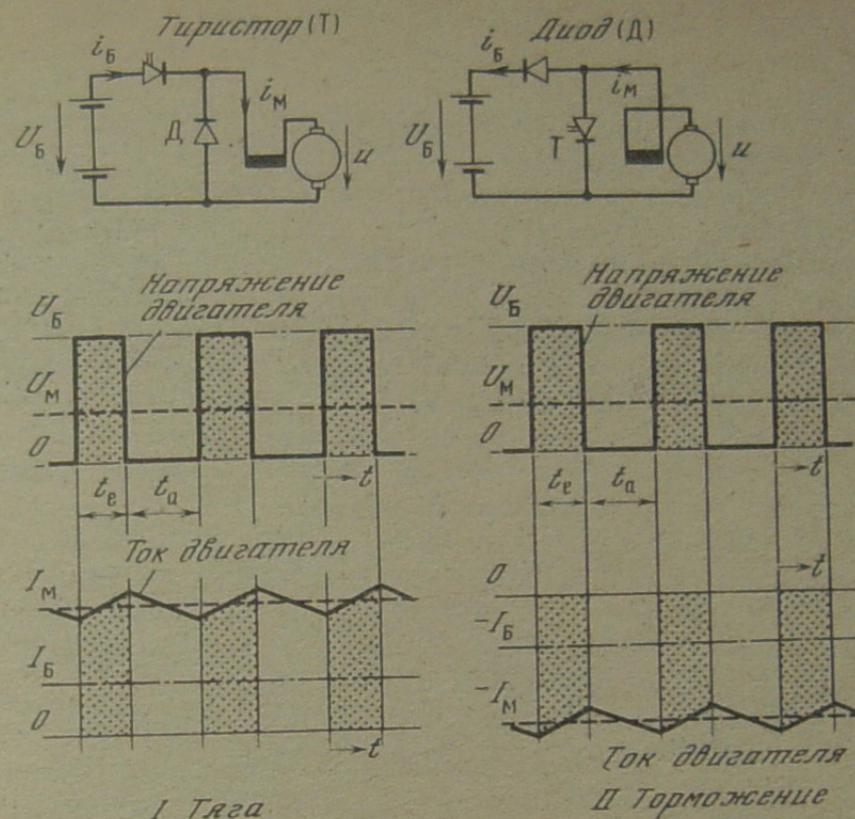


Рис. 31. Принципиальная схема импульсного регулирования

Способы изменения напряжения, подаваемого на двигатель, в процессе пуска используются и для регулирования скорости. Кроме того, регулирование скорости может осуществляться изменением магнитного потока. Однако при этом в соответствии с формулой (3.9) необходимо строить новую характеристику.

Особенности получаемых при указанных методах пуска и регулирования искусственных скоростных характеристик двигателя показаны на рис. 30. Расчет искусственных характеристик, пусковых сопротивлений и других элементов подробно рассмотрен в работе [13].

В настоящее время на электромобилях все более широкое применение находит так называемый импульсный метод регулирования скорости вращения двигателя постоянного тока. Сущность этого метода состоит в том, что для регулирования скорости производят периодическое прекращение подачи напряжения к двигателю от источника энергии, т. е. напряжение на двигатель подается в виде импульсов.

На рис. 31 показана принципиальная схема импульсного регулирования, на которой для ясности не показана цепь выключения тиристора. Там же показан характер изменения напряжения и тока двигателя и батареи.

Как видно из рисунка, в момент включения тиристора двигатель присоединяется на полное напряжение аккумуляторной батареи  $U_B$ . При выключении тиристора напряжение на двигателе отсутствует. Из рисунка следует, что среднее напряжение на двигателе  $U_M$  определяется отношением времени включения  $t_e$  к времени цикла:

$$U_M = U_B \frac{t_e}{t_a + t_e} \text{ В.} \quad (3.13)$$

Таким образом, регулируя время включения, можно плавно изменять среднее напряжение двигателя практически от нуля до полного напряжения аккумуляторной батареи.

Если периодические переключения производятся в течение длительного времени с определенной частотой (т. е.  $t_e + t_a = \text{const}$ ) и при постоянном соотношении длительности отдельных частей цикла, то скорость двигателя принимает установившееся значение.

В момент включения тиристора, когда двигатель присоединяется на полное напряжение аккумуляторной батареи, ток в цепи двигателя возрастает, в период отключения ток в якоре электродвигателя спадает (см. рис. 31). Благодаря тому что период переменного напряжения гораздо меньше электрической постоянной времени обмотки якоря, а также благодаря шунтированию двигателя диодом, через который проходит ток двигателя при выключенном тиристоре, ток в цепи якоря электродвигателя может оставаться практически постоянным. В то же время ток, потребляемый от источника питания, будет иметь импульсный характер. При этом во время импульса ток в цепи источника не будет отличаться от величины тока в якоре электродвигателя (см. рис. 31). Поэтому среднее значение тока в цепи источника будет, естественно, меньше среднего значения тока в якоре электродвигателя. Если пренебречь потерями в тиристоре, то получим баланс мощности:  $U_6 I_6 = U_M I_M$ , откуда с учетом формулы (3.13) среднее значение тока источника будет

$$I_6 = I_M \frac{t_e}{t_e + t_a}, \text{ А.} \quad (3.14)$$

При применении импульсного регулирования имеются потери в тиристоре и цепях его управления; увеличиваются магнитные потери в двигателе из-за пульсации тока. Однако эти потери значительно меньше, чем при ранее применявшихся способах пуска. Однако, пожалуй, самым главным преимуществом импульсной системы регулирования для автомобиля является облегчение управления, особенно при движении автомобиля в потоке машин. В этом случае при применявшихся способах регулирования для поддержания средней скорости движения (если эта скорость не соответствует установившейся скорости движения на какой-либо из имеющихся ездовых характеристик) приходилось использовать то разгон, то накат. В случае импульсного регулирования, аналогично регулированию автомобиля педалью акселератора, возможно получение любой постоянной скорости, т. е. импульсное регулирование позволяет работать в любой точке области, ограниченной предельными значениями силы тока и скоростной характеристикой двигателя (см. заштрихованную область на рис. 30).

Поскольку рассмотренный способ импульсного регулирования основан на изменении среднего напряжения на двигателе, то, пренебрегая некоторым увеличением магнитных потерь, с достаточной для тяговых расчетов точностью можно пользоваться естественной характеристикой.

Следует также отметить, что импульсная система регулирования позволяет создать эффективную систему электрического торможения с рекуперацией значительной части энергии. Принцип электрического торможения в этом случае тот же, что и для реостатно-рекуперативного торможения. Только в этом случае регулирование тока осуществляется с помощью периодического замыкания цепи двигателя, что наглядно можно проследить на рис. 31.

Учитывая преимущества импульсной системы регулирования и ее расширяющееся применение на автомобилях, в дальнейшем все рассужде-

ния даются применительно к этому виду системы управления тяговым двигателем.

В настоящее время импульсные системы регулирования электродвигателей постоянного тока достаточно хорошо изучены. Особенности тиристорного управления электрическим подвижным составом даны в литературе [15].

Имея электромеханические характеристики двигателя, можно перейти к построению тяговой характеристики электродвигателя. Для этого надо предварительно перестроить электромеханические характеристики тягового двигателя к точке приложения касательной силы тяги, т. е. необходимо получить зависимости  $P_k = f(I)$  и  $V_k = f(I)$ .

Пересчет тяговой характеристики электродвигателя производится по формуле (3.2).

Пересчет скоростной характеристики осуществляется по формуле

$$V = \frac{\pi n r_k}{30 i_p i_0}, \text{ м/с,} \quad (3.15)$$

где обозначения те же, что в формуле (3.2).

Техника пересчета простая: для каждого значения тока по электромеханическим характеристикам определяются соответствующие значения  $M$  и  $n$  и по формулам (3.2) и (3.15) пересчитываются на  $P_k$  и  $V$ .

Построение тяговой характеристики автомобиля  $P_k = f(V)$  на основе характеристик  $P_k = f(I)$  и  $V = f(I)$  не представляет трудностей: значениям тока  $I_1, I_2, I_3$  соответствуют значения скорости  $V_1, V_2, V_3$  и силы тяги  $P_{k1}, P_{k2}$  и  $P_{k3}$ .

Исходя из электромеханических характеристик двигателя в тормозном режиме, аналогичным образом строится тормозная характеристика автомобиля для электрического торможения.

При применении импульсного бесступенчатого регулирования зоной работы является вся область, ограничиваемая возможностями двигателя и автомобиля. Тяговая и тормозная характеристики зоны работы автомобиля с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения показаны на рис. 32.

В настоящее время благодаря применению тиристорных появилась возможность преобразования на автомобиле постоянного тока в переменный с регулируемой частотой. Это позволяет применять на автомобиле асинхронные бесколлекторные электродвигатели переменного тока, отличающиеся большей надежностью, меньшей стоимостью и рядом других преимуществ перед двигателями постоянного тока.

На рис. 33 приведена принципиальная схема (без цепей выключения тиристорных) преобразования постоянного тока аккумуляторной батареи в переменный. Возможные схемы и законы регулирования электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом подробно рассмотрены в работе [16].

Из теории электрических машин для асинхронных двигателей имеют место следующие зависимости при постоянном скольжении  $k$ :

$$M = f(U^2/k), \quad n = f(k).$$

Для получения хорошей тяговой характеристики, т. е. постоянного крутящего момента при пуске, до выхода двигателя на естественную характеристику одновременно с регулированием частоты питающего тока требуется изменять напряжение на двигателе в отношении  $U'/U = k'/k$ . При таком регулировании мощность изменяется пропорционально частоте.

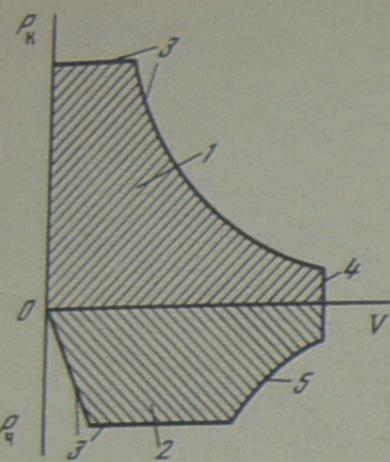
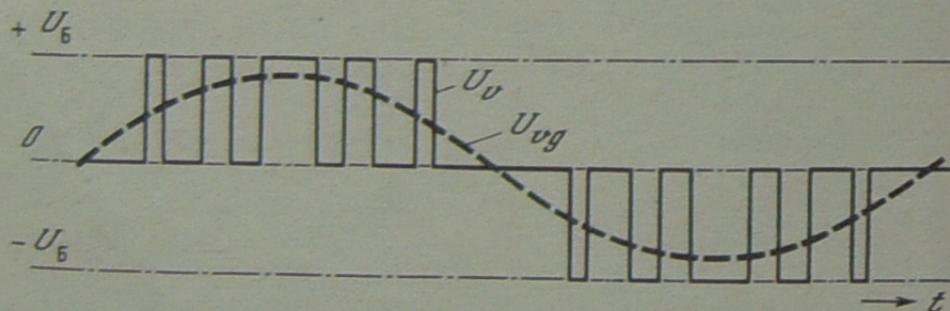
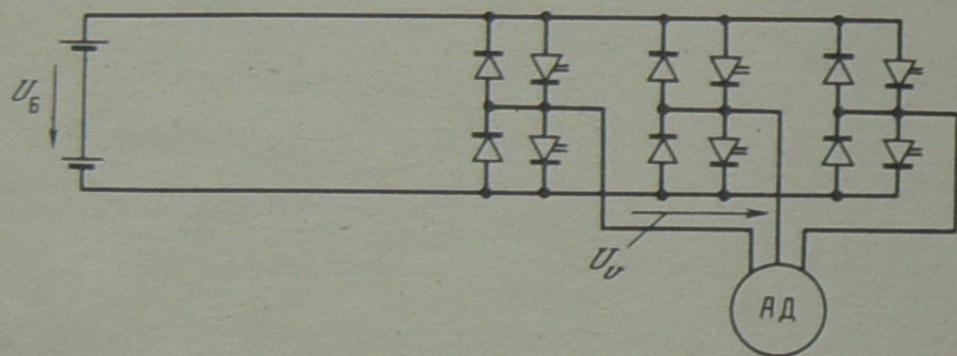


Рис. 32. Внешние тяговая и тормозная характеристики, а также рабочая зона электромобиля: 1 — тяга; 2 — торможение; 3 — ограничение по двигателю; 4 — ограничение по скорости; 5 — ограничение по сцеплению

Рис. 33. Принципиальная схема преобразования постоянного тока аккумуляторной батареи в переменный



После выхода на естественную характеристику для постоянства мощности нужно поддерживать величину  $M_k$  постоянной. Для этого напряжение должно изменяться обратно пропорционально корню квадратному из частоты  $U'/U = \sqrt{k'/k}$ .

При таких законах регулирования тяговая характеристика электромобиля с асинхронным двигателем становится по характеру очень похожей на тяговую характеристику с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения, а поскольку и для асинхронного двигателя используется бесступенчатое регулирование, то и зоны работы с асинхронным двигателем аналогичны таковым для двигателя постоянного тока с импульсным регулированием, изображенным на рис. 32.

С учетом изложенного выше, не вдаваясь в тонкости электронного регулирования, дальнейшее изложение принципиальных основ расчета технических параметров электромобиля дается применительно к наиболее распространенному типу тягового двигателя — двигателю постоянного тока с последовательным возбуждением и импульсным регулированием.

### 3.3. БАЛАНС ЭНЕРГИИ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЗАПАСА ХОДА ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

При движении электромобиля совершается работа, которая необходима для преодоления сопротивлений движению электромобиля. Если известны силы сопротивления движению ( $P_f$ ,  $P_l$ ,  $P_w$  и  $P_j$ ), то работа, затрачиваемая на преодоление сопротивлений при движении электромобиля по дороге на расстояние  $L$  (км), может быть выражена уравнением

$$A = \int_0^L (P_f + P_l + P_w + P_j) dL. \quad (3.16)$$

Если рассмотреть простейший случай — движение с постоянной скоростью ( $P_j = 0$ ,  $P_w = \text{const}$ ) по ровной горизонтальной дороге ( $P_l = 0$ ), то уравнение (3.16) примет вид

$$A = (P_f + P_w) L 10^3, \text{ Дж}. \quad (3.17)$$

Метод определения  $P_f$  и  $P_w$  был дан выше (см. раздел 3.1.).

Для дальнейших рассуждений уравнение (3.17) с учетом уравнений (3.4) и (3.6) представим в следующем виде:

$$A = GL(f + \rho V^2) 10^3, \text{ Дж},$$

где  $\rho = kF/13G$  — постоянная для данного электромобиля, остальные обозначения соответствуют принятым в формулах (3.4) и (3.6).

Дальнейшее преобразование дает

$$A = GL(f + \rho_w) 10^3 = GL\rho_3 10^3, \text{ Дж}, \quad (3.18)$$

где  $\rho_w$  — удельная сила сопротивления воздуха при данной скорости,  $\rho_w = \rho V^2$ , Н/Н;  $\rho_3 = f + \rho_w$  — удельное сопротивление движению электромобиля по ровной горизонтальной дороге с определенной постоянной скоростью, Н/Н.

Теперь, если для заданной скорости известны КПД тягового электродвигателя  $\eta_m$  и трансмиссии  $\eta_{тр}$ , то на основании формулы (3.18) можно определить необходимый расход энергии аккумуляторной батареи электромобиля при движении на расстояние  $L$ :

$$A_6 = \frac{GL\rho_3 10^3}{\eta_m \eta_{тр}}, \text{ Дж} \quad (3.19)$$

или

$$A_6 = \frac{GL\rho_3}{3,6 \cdot 10^3 \eta_m \eta_{тр}}, \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \quad (3.20)$$

В первом приближении запас энергии аккумуляторной батареи может быть определен по массе батареи  $M_6$  и удельной энергии  $w_6$ :

$$W_6 = M_6 w_6 10^{-3}, \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \quad (3.21)$$

Очевидно, что максимальный пробег электромобиля — его запас хода — соответствует полному расходу запаса энергии аккумуляторной батареи, т. е. он определяется из условия баланса энергии:  $W_6 - A_6 = 0$ . Из этого условия на основе уравнений (3.20) и (3.21), выразив массу батареи через ее вес  $G_6$ , получим уравнение, определяющее запас хода электромобиля в

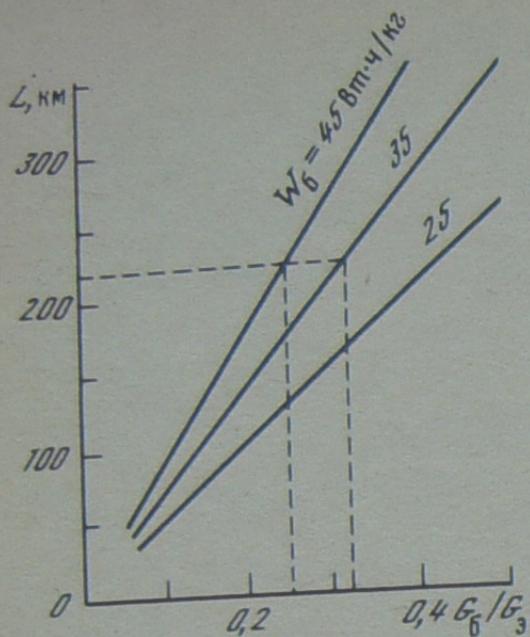
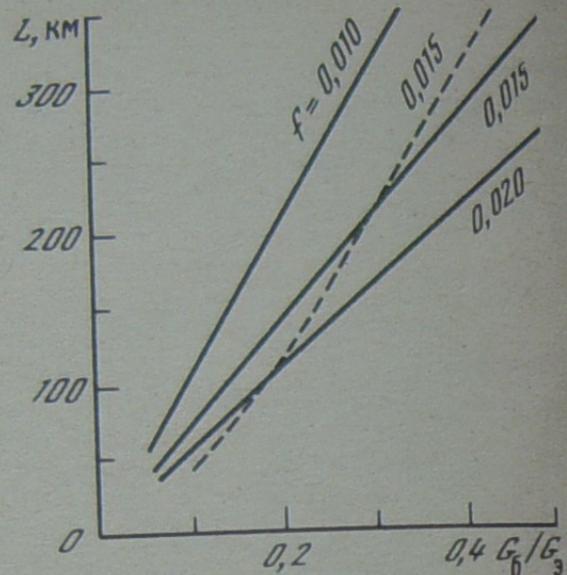


Рис. 34. Зависимость запаса хода электромобиля от отношения веса батареи к полному весу и от удельной энергоёмкости аккумуляторной батареи ( $V = 40$  км/ч,  $\rho_3 = 0,015$ )

Рис. 35. Зависимость запаса хода электромобиля от отношения веса батареи к полному весу и от удельного сопротивления качению: — по формуле (3.22); — по формуле (3.26)



случае движения по ровной горизонтальной дороге с постоянной скоростью

$$L_v = \frac{G_6}{G} \frac{w_6 3,6 \eta_m \eta_{тр}}{g \rho_3}, \text{ км.} \quad (3.22)$$

Из формулы следует, что для увеличения запаса хода электромобиля надо стремиться к возможно большему отношению веса батареи к полному весу электромобиля, к применению аккумуляторов с большей удельной энергией, к увеличению КПД тягового двигателя и трансмиссии и к снижению удельного сопротивления движению. На рис. 34 и 35 показано влияние отдельных параметров на запас хода электромобиля.

Как видно из рис. 34, увеличение отношения веса аккумуляторной батареи к полному весу с 0,25 до 0,32 эквивалентно увеличению удельной энергии аккумуляторной батареи с 35 до 45 Вт · ч/кг.

Данные рис. 35 показывают зависимость запаса хода электромобиля от отношения  $G_6/G$  и удельного сопротивления качению при условии, что при малых скоростях движения (до 40–50 км/ч) удельная сила сопротивления воздуха незначительна. Из рисунка видно, насколько значительно влияние удельного сопротивления качению на запас хода при движении с постоянной скоростью.

Главным элементом, который делает формулу (3.22) весьма приближенной, является удельная энергия, которая, как было показано в гл. 2, зависит от многих факторов. Для уточнения расчета запаса хода было предложено [17] учитывать изменение отдачи энергии аккумуляторной батареи в зависимости от времени разряда с помощью коэффициента отдачи по энергии:

$$k_w = w/w_n, \quad (3.23)$$

где  $W$  — количество энергии, отдаваемое аккумуляторной батареей при

данном режиме разряда, кВт · ч;  $W_n$  — количество энергии, отдаваемое при номинальном режиме разряда, кВт · ч.

С достаточной точностью, считая номинальным режимом 5-часовой разряд, коэффициент отдачи по энергии определим уравнением

$$k_w = \sqrt[n]{0,2 t_p}, \quad (3.24)$$

где  $t_p$  — время разряда, ч;  $n$  — постоянная, характерная для данного типа аккумуляторов. Для движения с постоянной скоростью

$$t_p = L_v/V, \text{ ч.} \quad (3.25)$$

С учетом (3.23), (3.24), (3.25) формулу (3.22) можно преобразовать в следующую:

$$L_v = \frac{G_6 w_n 3,6 \eta_m \eta_{тр}^{n-1}}{G g \rho_3} \sqrt[n]{0,72 G_6 w_n \eta_m \eta_{тр} / G V g \rho_3}, \text{ км.} \quad (3.26)$$

Очевидно, что для случая, когда  $t_p = 5$ , коэффициент отдачи по энергии становится равным 1 и, следовательно, запасы хода, рассчитанные по формулам (3.22) и (3.26), будут равны. На рис. 35 пунктиром нанесена зависимость  $L = f(G_6/G)$ , рассчитанная по формуле (3.26) для  $n = 3$  и  $f = 0,015$  (другие данные те же, что и для зависимостей). Для приведенного примера разница значений запасов хода, рассчитанных по формулам (3.22) и (3.26), в пределах, характерных для современных электромобилей отношений  $G_6/G = 0,23 \div 0,33$ , довольно незначительна. Различие получается существенным, если расчет проводится для более высоких скоростей движения — 50–70 км/ч.

Во многих странах мира ведутся работы по установлению типичных режимов движения автомобилей (а следовательно, и электромобилей) в городах, что необходимо для установления характерных значений токсичности автомобилей. В разных странах приняты различные циклы движения.

В настоящее время наибольшее распространение получили два цикла, по которым проводятся испытания автомобилей на токсичность. Так называемый европейский цикл, рекомендованный Европейской экономической комиссией (ЕЭК) ООН и принятый в СССР и в большинстве европейских стран, и американский цикл, принятый в США.

Полученный на основе европейского ездового цикла типичный цикл движения электромобиля показан на рис. 36. Дополнительно отметим, что расстояние, проходимое электромобилем по рассматриваемому циклу, равно 1,013 км. Показанный на рис. 36 цикл движения характерен только для легковых электромобилей и грузовых особо малой и малой грузоподъемности.

Расчет запаса хода электромобиля с учетом заданного цикла движения требует предварительного построения графика нагрузок аккумуляторной батареи, т. е. определение функции  $I = f(t)$ . Нагрузка тяговой аккумуляторной батареи складывается из нагрузки от тягового электропривода и нагрузки от вспомогательного электрооборудования (освещение, приборы, вентиляция и т. д.). На основании изложенных выше методов строится график сил сопротивления движению в цикле, по которому рассчитывается нагрузка батареи от тягового электропривода.

Для определения нагрузки от вспомогательного электрооборудования могут быть использованы известные методы расчета автомобильного электрооборудования.

На рис. 37 приведен пример графика нагрузки тяговой аккумуляторной батареи при движении электромобиля по европейскому циклу. На этом

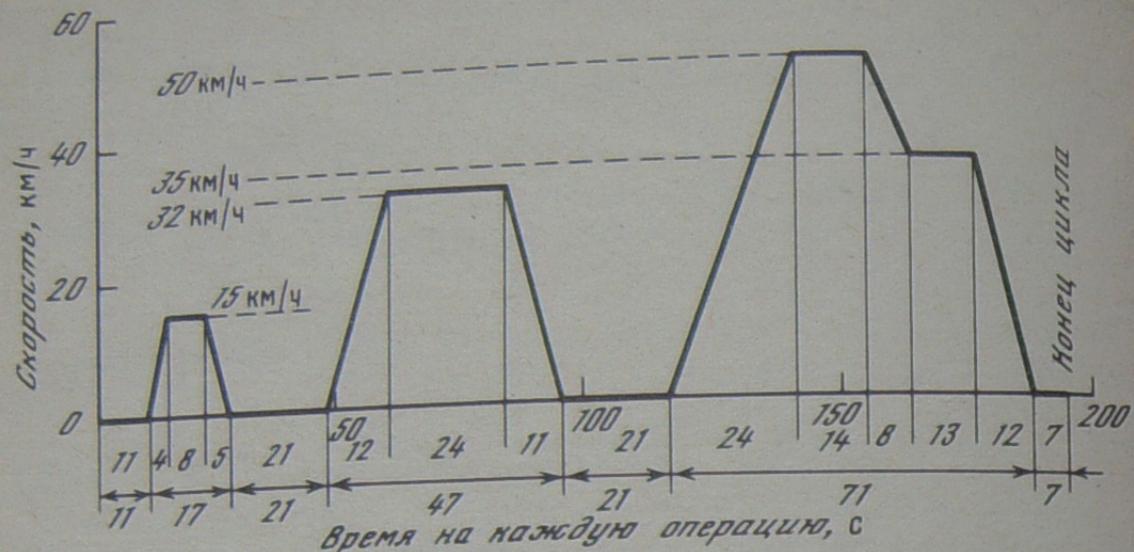


Рис. 36. Европейский ездовой цикл применительно к электромобилю

рисунке показан также ток заряда аккумуляторной батареи, что имеет место при использовании рекуперативного торможения. Расчет запаса хода основан на определении емкости, теряемой аккумуляторной батареей при движении электромобиля. Расчет остаточной емкости батареи удобно проводить с использованием таблицы, характер которой показан ниже.

В первую графу таблицы заносится количество циклов, которые рассматриваются, и их порядок. В принципе расчет может вестись отдельно для каждого цикла, однако тогда объем расчета резко возрастает. Так, например, для запаса хода 101,3 км необходимо будет при расчете по европейскому циклу провести сто расчетов цикла. Для практических целей можно одновременно рассматривать до 15–20 циклов. Поэтому в графу 1 заносятся: первые 10 циклов (до тех пор, пока не будут рассмотрены все этапы цикла), затем вторые 10 циклов и т. д.

Во вторую графу заносится номер этапа в цикле. За этап принимается отрезок времени, в течение которого нагрузка на батарею считается постоянной.

В третью графу заносится продолжительность этапа, которая берется по графику нагрузки.

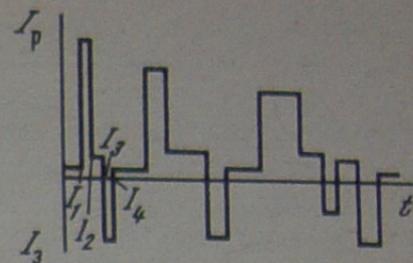
В четвертой графе проставляется характер работы аккумуляторной батареи на данном этапе — "разряд" или "заряд".

В пятую графу заносится средняя величина тока нагрузки батареи.

В шестой графе проставляется расходуемая за данный этап движения емкость, вычисляемая как произведение тока нагрузки (графа 5) на продолжительность этапа (графа 3).

В седьмую графу помещается средняя за взятое количество циклов температура электролита. Температурный режим батареи определяется исходя из температуры наружного воздуха, температуры электролита в начале движения, условий теплообмена батареи и окружающей среды, времени движения, режима нагрузки и т. д. При этом температура электролита при эксплуатации современных аккумуляторных батарей не должна быть ниже  $-5^{\circ}\text{C}$ , так как в противном случае аккумулятор теряет большую часть емкости и имеет плохие тяговые характеристики. Для уменьшения охлаждения необходимо применять теплоизоляцию или даже подогрев батареи. В жаркие дни температура батареи не должна повышаться выше  $+50-60^{\circ}\text{C}$ , для чего необходимо применять охлаждение.

Рис. 37. Типичная диаграмма токовой нагрузки аккумуляторной батареи электромобиля при движении по европейскому циклу



В восьмую графу заносится остаток емкости от предыдущего этапа. Для первого этапа в восьмой графе ставится 100, из предположения, что в начале движения батарея полностью заряжена. Для второго этапа в восьмую графу заносится остаточная емкость от первого этапа и т. д.

В девятой графе проставляется приведенная номинальная емкость аккумуляторной батареи при данной температуре электролита и разрядном токе, для чего можно использовать как расчетные формулы, так и специальные номограммы.

В десятой графе проставляется величина отданной или полученной емкости аккумуляторной батареи в процентах. Данные этой графы получаются делением данных графы 6 на данные графы 9 и умножением результата на 100.

Наконец, в графе 11 проставляется величина остаточной емкости к концу этапа в процентах от номинальной емкости аккумуляторной батареи.

Движение электромобиля осуществляется до достижения определенного значения остаточной емкости. Поэтому расчет запаса хода с помощью описанного метода заключается в определении количества циклов, по прохождении которых остаточная емкость достигает предельно допустимой величины. Так, например, когда остаточная емкость должна быть не менее 20% и эта величина достигается при прохождении, допустим, 35 циклов, то, если это европейский цикл, запас хода будет  $1,013 \cdot 35 = 35,5$  км.

Следует отметить, что значение остаточной емкости может определяться как особенностями применяемых аккумуляторов (одни могут отдавать всю номинальную емкость, другие — нет), так и изменением динамических качеств электромобиля в процессе разряда батареи. Поэтому при расчете запаса хода предварительно необходимо определить допустимое значение остаточной емкости по условиям динамики электромобиля, сравнить ее с допустимой для данного типа аккумуляторов и расчет вести до большего значения.

При движении по циклам допустимая остаточная емкость по условиям динамики определяется в случае обеспечения необходимой интенсивности разгона, когда от батареи требуется наибольшая мощность.

Приведенные рассуждения справедливы для любого цикла.

Метод расчета запаса хода с помощью таблицы пригоден также и для электромобилей с комбинированным питанием, так как он позволяет учитывать и подзарядку. График нагрузки (подзарядки аккумуляторной батареи) при комбинированном питании строится на основании потребной силы тяги и характеристик совместной работы батареи и подзарядного агрегата.

Определение запаса хода электромобиля с построением кривых движения и потребления тока по известному циклу может быть весьма точным. Однако применение этих методов целесообразно только для конкретных маршрутов. При оценке же конструкции электромобиля требуется определение некоего среднеэксплуатационного запаса хода. При этом применение "типичных" значений, характеризующих условия эксплуатации,

делает нецелесообразным использование детальных методов расчета запаса хода, что объясняется явным несоответствием скрупулезности расчета запаса хода и неизбежной условности данных, характеризующих "типичные" условия эксплуатации. Например, одно изменение состояния покрытий улиц городов в зоне умеренного климата СССР (заснеженные зимой и чистые летом) обуславливает настолько значительное изменение величины запаса хода автомобиля, что делает возможным применение более простых методов. Такие методы основаны на использовании формулы (3.26), в которую подставляются рассчитываемые различными методами типичные для условий эксплуатации значения удельного сопротивления движению и режима разряда батареи.

## ГЛАВА 4

### ВОЗМОЖНОСТЬ СОЗДАНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

#### 4.1. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

В соответствии с утвержденной методикой экономическая эффективность новой техники оценивается размером годового экономического эффекта от производства и использования новых средств труда долговременного применения (такowymi являются автомобили и электромобили) по формуле

$$\mathcal{E} = \left[ 3_1 \frac{B_2}{B_1} \frac{P_1 + E_H}{P_2 + E_H} + \frac{(I'_1 - I'_2) - E_H (K'_2 - K'_1)}{P_2 + E_H} - 3_2 \right] A_2, \text{ руб.}, \quad (4.1)$$

где  $3_1, 3_2$  — приведенные затраты единицы соответственно базового и нового средства труда, руб.;  $B_1, B_2$  — годовые объемы работы, производимые при использовании единицы соответственно базового и нового средства труда, в натуральных единицах;  $P_1, P_2$  — 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 эффективности (0,15);  $K'_1, K'_2$  — сопутствующие капитальные вложения потребителя (капитальные вложения без учета стоимости рассматриваемых средств труда) при использовании базового и нового средства труда в расчете на объем работы, производимой с помощью нового средства труда, руб.;  $I'_1, I'_2$  — годовые эксплуатационные издержки потребителя при использовании им базового и нового средства труда в расчете на объем работы, производимой с помощью нового средства труда, руб. В этих издержках учитывается только часть амортизации, предназначенная на капитальный ремонт средств труда, т.е. без учета средств на реновацию, а также амортизационные отчисления по сопутствующим капитальным вложениям потребителя;  $A_2$  — годовой объем производства новых средств труда в расчетном году, в натуральных единицах.

Если в формуле (4.1) индексы 1 относить к базовому (для сравнения) автомобилю, а индексы 2 — к электромобилю, то тогда ее можно рассматривать как базу для расчета годового экономического эффекта от производства и использования электромобилей.

Расчет затрат по сравниваемому автомобилю осуществляется обычными методами, известными из литературы [18].

Методы расчета затрат для электромобилей еще недостаточно разработаны. Ниже рассматриваются методы расчета затрат применительно к аккумуляторным электромобилям. Эти же методы могут использоваться для расчета части затрат для электромобилей с комбинированными энергосиловыми установками. Для расчета эффективности электромобилей с электрохимическими генераторами в настоящее время еще нет необходимой исходной информации.

При оценке эффективности аккумуляторных электромобилей следует иметь в виду два существенных момента:

- необходимость учета разного срока службы аккумуляторной батареи и механической части (шасси и кузов) электромобиля;
- несопоставимость вариантов по влиянию на окружающую среду.

Чтобы учесть отмеченные обстоятельства, формулу (4.1) следует дополнить следующим образом:

$$\mathcal{E} = \left[ 3_1 \frac{B_2}{B_1} \frac{P_1 + E_H}{P_2 + E_H} + \frac{(I'_1 - I'_2) - E_H (K'_2 - K'_1)}{P_2 + E_H} - 3_2 - 3_6 \frac{P_6 + E_H}{P_2 + E_H} f + \frac{Y_1 - Y_2}{P_2 + E_H} \right] A_2, \text{ тыс. руб.}, \quad (4.2)$$

где  $3_2$  — приведенные затраты на производство механической части (шасси и кузов) электромобиля, руб.;  $3_6$  — приведенные затраты на производство одного комплекта аккумуляторных батарей, руб.;  $(P_6 + E_H)/(P_2 + E_H)$  — коэффициент учета разницы срока службы комплекта аккумуляторных батарей и электромобиля;  $P_2 P_6$  — доли отчислений от балансовой стоимости на полное восстановление механической части (шасси и кузов) электромобиля ( $P_2$ ) и комплекта аккумуляторных батарей ( $P_6$ ), рассчитываются как величины, обратные срокам службы;  $f$  — коэффициент учета наличия сменных комплектов аккумуляторных батарей;  $Y_1, Y_2$  — размеры годового экономического ущерба, связанного с загрязнением окружающей среды автомобилем и электромобилем, руб.;  $A_2$  — годовой объем производства электромобилей, тыс. шт.

Остальные обозначения те же, что и в формуле (4.1).

Возможность практического использования формулы (4.2) обуславливает необходимость определения всех ее составляющих.

Как следует из формулы (4.2), расчет годового экономического эффекта требует знания размера годового выпуска. Очевидно, что размер годового выпуска зависит от масштабов возможного применения (т.е. возможного размера парка —  $N_2$ , тыс. шт.) электромобилей. Эта зависимость имеет вид:  $A_2 = P_2 N_2$ , тыс. шт.

Вопрос определения возможных масштабов применения различных типов электромобилей был рассмотрен ранее (см. гл. 1).

Методы расчета объема транспортной работы электромобиля  $B_2$  также рассмотрены ранее (см. гл. 1). Следует отметить, что при сравнении годовой объем работы заменяемого автомобиля должен быть равным годовой производительности электромобиля, что вытекает из следующих соображений.

Электромобиль следует применять только на тех перевозках, где их основной недостаток — ограниченный запас хода — не сказывается, т.е. запас хода электромобиля (на одну зарядку или с использованием под-

зарядки или смены батареи в течение рабочего дня в периоды необходимых по технологии перевозок длительных простоев транспортных средств) является достаточным для пробега в течение рабочей смены, и, следовательно, электромобиль имеет на таких перевозках такие же суточные пробеги, как заменяемый им автомобиль.

Поскольку сравниваются однотипные машины, то их грузоподъемности в общем случае должны быть одинаковыми. А раз маршрут движения и грузоподъемность не меняются, то равными должны быть и коэффициенты использования пробега и грузоподъемности.

В настоящее время коэффициент технической готовности эксплуатируемых автомобилей очень высок (0,8—0,9 и выше), в то время как коэффициент использования парка существенно меньше (0,6—0,7). Поэтому применение в принципе более надежных электромобилей вряд ли сможет заметно изменить значения сложившихся по группам машин коэффициентов использования парка, т.е. в настоящее время эти коэффициенты можно считать в нашем случае равными.

Таким образом, все величины, определяющие объем транспортной работы, являются одинаковыми для базовой модели автомобиля и электромобиля, и, следовательно, сами объемы транспортной работы также должны быть равными.

Доля отчисления от балансовой стоимости на полное восстановление электромобиля  $P_2$  рассчитывается как величина, обратная сроку службы электромобиля в годах. Срок службы электромобиля по литературным данным может превышать срок службы автомобиля до 1,5—2,0 раз. Эти данные основаны на том факте, что тихоходные электромобили, имеющие запас хода от 20 до 65 км, имеют срок службы до 15—20 лет, а срок службы автомобилей, как известно, составляет в основном 7—8 лет. Однако сопоставление указанных сроков службы неправильно. Ведь если бы автомобиль использовать только на тех перевозках, где применяются тихоходные электромобили, то их годовой пробег составлял бы всего от 4,5 до 14 тыс. км, что, считая пробег до капитального ремонта равным 150 тыс. км, дает возможный срок службы от 10 до 30 лет! Таким образом, если считать по пробегу, то сроки службы автомобилей и электромобилей получаются равными.

Приведенные затраты на производство механической части электромобиля  $Z_2$  слагаются из затрат на производство шасси и кузова  $Z_{2M}$ , затрат на тяговое электрооборудование — тяговый электродвигатель  $Z_{2Э}$  и систему его регулирования  $Z_{2С}$ , включающую в себя силовой блок, блок питания, блок управления, коммутационную аппаратуру и т.п.

Затраты на производство шасси и кузова  $Z_{2M}$  электромобиля в значительной мере зависят от типа конструкции.

При создании электромобиля на базе существующего автомобиля затраты на его производство правильней и проще всего определять прямым расчетом, вычитая из затрат на производство базовой модели автомобиля затраты, связанные с деталями и агрегатами, которые не входят в конструкцию электромобиля (например, двигатель внутреннего сгорания, коробка перемены передач и т.д.), и добавляя затраты на производство новых деталей, необходимых для конвертации конструкции (например, подрамник для крепления тяговой аккумуляторной батареи).

При создании оригинальной конструкции электромобиля может быть использован, только в более общей форме, аналогичный подход: существующие методы предварительной оценки затрат на производство следует уточнить с учетом особенностей конструкции электромобиля, т.е. не учитывать затраты на двигатель внутреннего сгорания, коробку передач и т.д.

Основным методом предварительной оценки затрат на производство автомобилей является использование множественной корреляционной зависимости этих затрат от основных параметров автомобиля. Анализ известных работ показывает определяющее значение двух факторов — собственной массы и масштаба производства — на размер затрат на производство автомобиля. Поэтому, учитывая, что принципы конструкции и изготовления электромобиля не должны значительно отличаться от принципа конструкций и принятой технологии изготовления однотипных автомобилей, общая закономерность изменения затрат на производство шасси и кузова электромобиля может быть аналогичной.

Принимая во внимание возможность широкой унификации отдельных узлов и агрегатов электромобиля с выпускаемыми автомобилями и несомненную ее целесообразность, в общую зависимость ввели коэффициент, учитывающий в общей стоимости долю стоимости оригинальных элементов конструкции.

С учетом изложенных соображений затраты на производство (точнее, как это уже отмечалось выше, рассчитывается себестоимость изготовления) шасси и кузова электромобиля в общем виде могут быть представлены следующим образом:

$$Z_{2M} = (a_M + b_M G_C) [n(A_2^{-0,2} - A_n^{-0,2}) + A_n^{-0,2}], \text{ руб.}, \quad (4.3)$$

где  $G_C$  — собственная масса электромобиля, кг;  $A_2$  — годовой объем производства электромобилей, тыс. шт.;  $A_n$  — годовой объем производства унифицированных деталей, тыс. шт.;  $n$  — доля в стоимости оригинальных элементов конструкции;  $a_M, b_M$  — постоянные коэффициенты, зависящие от типа электромобиля (грузовой, легковой и т.п.) и его конструкции (преимущественное использование обычных сталей, использование легких сплавов и т.п.).

Значения коэффициентов  $a_M$  и  $b_M$  в формуле (4.3) в настоящее время можно определить только приближенно. Так, считая  $n=0$ , приходим к частному случаю, когда электромобиль создается на базе серийного автомобиля. Это позволяет, используя обычные методы корреляционного анализа и "искусственные" экспериментальные данные (представляющие собой затраты без расходов на производство двигателя и коробки перемены передач для конкретных моделей выпускаемых автомобилей), определить значения коэффициентов  $a_M$  и  $b_M$ .

Принципиальной особенностью электромобилей является совершенно определенная взаимосвязь обоих факторов — собственной массы и масштаба производства, определяющих затраты на производство. Эта взаимосвязь вытекает из следующего: существует зависимость между изменением массы электромобиля (одного и того же типа конструкции) и запасом хода; в свою очередь, именно запас хода электромобиля определяет сферу и масштабы его возможного применения, взаимосвязь возможных масштабов использования и производства может быть представлена графически в виде трехмерного графика (рис. 38).

Практически учет существующей взаимосвязи объемов производства и собственной массы (для определенного типа конструкции) обуславливает принципиальное отличие зависимости затрат на производство от масштабов годового выпуска для электромобиля от аналогичной зависимости для автомобиля: у электромобиля с увеличением масштабов производства для обеспечения большего запаса хода растет собственная масса (так как для обеспечения большего запаса хода требуется увеличения массы аккумуляторной батареи, для транспортировки которой требуется более прочная и, следовательно, большей массы конструкция). Таким образом, один фактор способствует

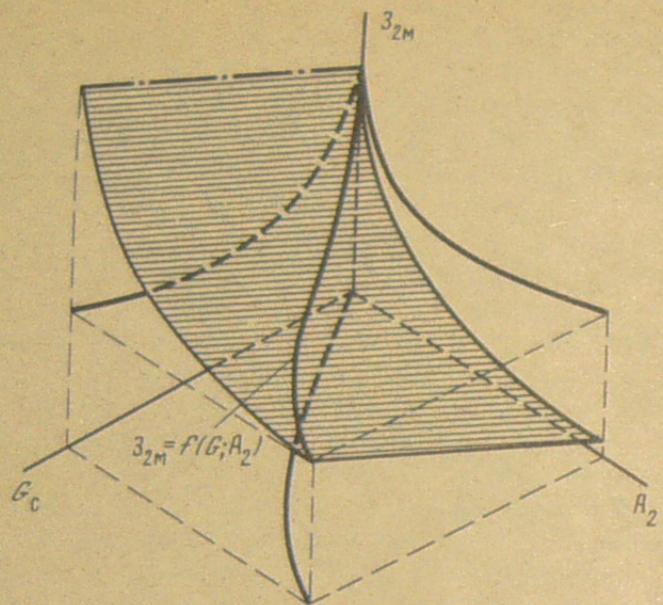


Рис. 38. Взаимосвязь основных факторов, определяющих затраты на производство шасси и кузова электромобиля

уменьшению затрат на изготовление, другой в то же время действует в противоположном направлении, т.е. имеет место классический случай, когда можно ожидать появления минимума. И действительно, как показали расчеты для электромобилей, предназначенных для использования современных и улучшенных типов аккумуляторов, в пределах разумных значений масштаба производства имеет место минимум затрат на производство. В качестве примера на рис. 39 приведены результаты расчета изменения затрат на производство шасси и кузова для грузового электромобиля особо малой грузоподъемности, рассчитанного на использование современных аккумуляторов, в зависимости от возможного масштаба производства.

Наличие взаимосвязи между масштабом производства и собственной массой электромобиля обуславливает также принципиальное изменение зависимости затрат на производство от собственной массы электромобиля. Причины и характер этого изменения аналогичны рассмотренным выше применительно к влиянию на затраты на производство масштабов применения. В качестве примера на рис. 40 показана зависимость изменения затрат на производство шасси и кузова для грузового электромобиля особо малой грузоподъемности, рассчитанного на использование современных аккумуляторов, в зависимости от изменения собственной массы при одном и том же типе конструкции, когда увеличение массы связано с увеличением запаса хода.

Затраты на производство тягового электродвигателя  $Z_{2э}$  могут быть определены в зависимости от степени проработки анализируемой конструкции либо путем подробного постатейного калькулирования, либо с использованием укрупненных методов. В качестве последних для расчета затрат на производство электродвигателей уже давно применяют метод, основанный на использовании множественной корреляционной зависимости затрат на производство от основных параметров двигателя.

Поскольку наибольшее влияние на стоимость изготовления электродвигателей имеют его мощность и масштаб производства, то укрупненный расчет затрат на производство тягового электродвигателя электромобиля

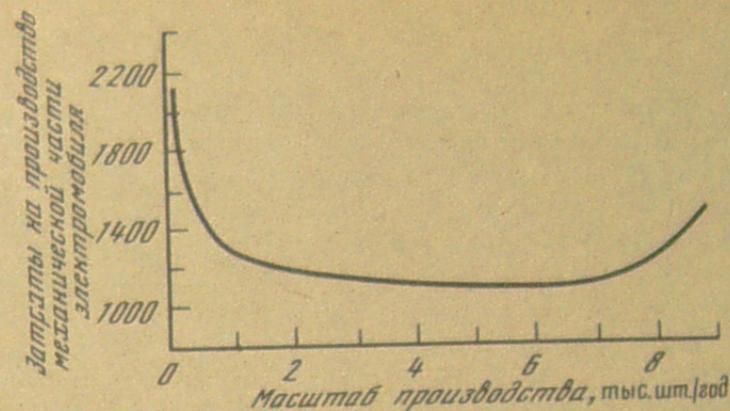


Рис. 39. Изменение затрат на изготовление шасси и кузова электромобиля особо малой грузоподъемности на современных никель-железных аккумуляторах от масштаба возможного производства

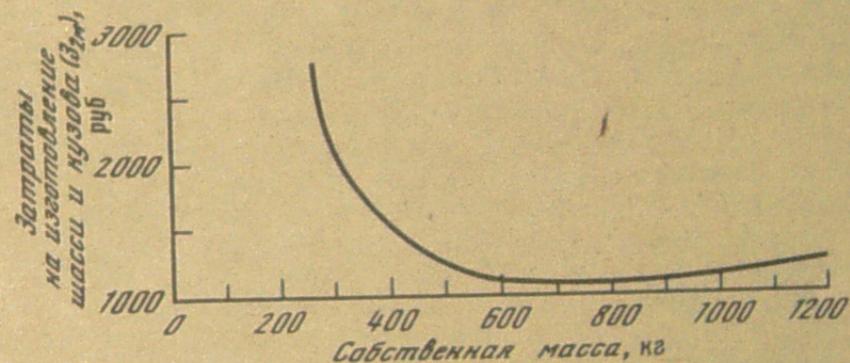


Рис. 40. Изменение затрат на изготовление шасси и кузова электромобиля особо малой грузоподъемности на современных никель-железных аккумуляторах от собственной массы, увеличение которой связано с увеличением запаса хода

можно производить, используя зависимость

$$Z_{2э} = (a_э + b_э N_d) A_2^{-0,1}, \text{ руб.}, \quad (4.4)$$

где  $a_э$ ,  $b_э$  — постоянные коэффициенты, зависящие от конструкции двигателя;  $N_d$  — номинальная мощность тягового электродвигателя, кВт.

В настоящее время фактических данных по величине затрат на производство тяговых электродвигателей электромобилей очень мало, чтобы считать предложенную зависимость окончательной. Однако следует указать, что уравнение (4.4) было выбрано на основе анализа данных, содержащихся в технических заданиях на отечественные электромобили.

Для проведения предварительных расчетов значение номинальной мощности тягового электродвигателя можно определить на основе анализа однотипных современных моделей электромобилей, тяговые электродвигатели которых обеспечивают им высокие динамические качества и максимальную скорость движения не менее 55–60 км/ч. На основании анализа имеющихся данных были получены следующие зависимости (подставляя полную массу  $G_{п}$  в кг):

$$\text{для грузовых электромобилей} \quad (4.5)$$

$$N_d = 7,8 G_{п} \cdot 10^{-3}, \text{ кВт},$$

$$\text{для легковых электромобилей} \quad (4.6)$$

$$N_d = 10^{-2} G_{п}, \text{ кВт},$$

для электробусов

$$N_{д} = 5,5 G_{п} \cdot 10^{-3}, \text{ кВт.} \quad (4.7)$$

При определении затрат на изготовление тягового электродвигателя необходимо, так же как при расчете затрат на изготовление шасси и кузова, учитывать взаимосвязь масштабов возможного производства электромобилей от его основных параметров, в том числе такая взаимосвязь получается и со значением номинальной мощности; чем выше масштабы возможного производства, тем требуется больший запас хода электромобиля, который можно обеспечить, только применяя батарею большей емкости и, следовательно, массы, а с ростом массы электромобиля увеличивается и номинальная мощность электромобиля.

Затраты на производство системы регулирования тягового электродвигателя  $Z_{2c}$  в настоящее время оценивать весьма затруднительно. Объясняется это в первую очередь тем, что современные электронные системы регулирования тяговых электродвигателей являются сравнительно молодой и довольно обширной областью науки и техники. В результате почти для каждой новой модели электромобиля имела место разработка и новой системы регулирования. Однако имеющиеся данные о возможной величине затрат на изготовление системы регулирования в нашей стране практически не учитывают расходов НИИ и КБ на исследовательские работы и при изготовлении единичных образцов системы, т.е. действительные затраты на них не определялись. Поэтому в качестве предварительных ориентиров были использованы данные из технических заданий на отечественные электромобили. Экстраполяцию этих данных предложено осуществлять для других систем по формуле

$$Z_{2c} = a_c N_g^{0,5} A_2^{-0,75}, \text{ руб.,} \quad (4.8)$$

где  $a_c$  — постоянный коэффициент.

При использовании уравнения (4.8) также следует иметь в виду наличие взаимосвязи.

Приведенные затраты на производство комплекта аккумуляторных батарей  $Z_6$  в зависимости от того, на какой тип аккумуляторов ориентируются в проекте электромобиля, определяются либо по фактическим приведенным затратам на производство (когда ориентируются на уже выпускаемую модель аккумуляторов), либо используется укрупненный метод расчета, основанный на применении удельных (на 1 кВт · ч отдаваемой энергии) затрат на производство. Учитывая отмеченную выше возможность использования в расчетах более доступных данных об отпускной стоимости, затраты на производство комплекта аккумуляторных батарей можно определять по формуле

$$Z_6 = c_6 W, \text{ руб.,} \quad (4.9)$$

где  $c_6$  — удельная стоимость рассматриваемого типа аккумуляторной батареи, руб./кВт · ч;  $W$  — номинальная энергоемкость комплекта аккумуляторных батарей электромобиля, кВт · ч.

Долю отчислений от балансовой стоимости на полное восстановление комплекта аккумуляторных батарей  $P_6$  рекомендуется рассчитывать по формуле

$$P_6 = a_{ц} \alpha / T_{ц}, \quad (4.10)$$

где  $a_{ц}$  — коэффициент использования электромобиля;  $T_{ц}$  — срок службы аккумуляторной батареи в циклах;  $a_{ц}$  — предельно возможное использование количества циклов в году.

Если электромобиль используется без применения подзаряда аккумуляторов в течение рабочего дня, то коэффициент  $a_{ц}$  в формуле (4.10) следует принимать равным 365. Физическое значение коэффициента  $a_{ц}$  представляет собою количество полных зарядно-разрядных циклов аккумуляторной батареи электромобиля в течение года при условии ежедневного использования электромобиля.

При расчете эффективности в целом по парку электромобилей коэффициент  $a_{ц}$  рекомендуется также брать равным 365, так как применение на части электромобилей подзарядки батарей в течение рабочего дня еще не означает увеличения полного количества циклов, поскольку подзарядка может осуществляться и не полностью разряженной батареей. В последнем случае срок службы аккумуляторов может возрасти.

Коэффициент учета наличия сменных комплектов аккумуляторных батарей  $f$  в настоящее время должен учитывать не столько смену батарей в течение рабочего дня, сколько необходимость наличия оборотного фонда батарей в эксплуатации. Рекомендуется коэффициент  $f$  принимать равным 1,1—1,2.

Годовые эксплуатационные затраты можно представить в следующем виде:

$$U'_2 = U_3 + U_{м2} + U_{ор2} + U_{ш2} + U_{кр2}, \text{ руб.,} \quad (4.11)$$

где  $U_3$  — годовые затраты на электроэнергию для электромобиля, руб.;  $U_{м2}$  — годовые затраты на эксплуатационные материалы для электромобиля, руб.;  $U_{ор2}$  — годовые затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт для электромобиля, руб.;  $U_{ш2}$  — годовые затраты на шины для электромобиля, руб.;  $U_{кр2}$  — годовые издержки автотранспортного предприятия, предназначенные на капитальный ремонт электромобиля, руб.

Для вновь разрабатываемого автомобиля предварительное определение размеров эксплуатационных расходов часто также осуществляется на базе существующих нормативных документов путем установления корреляционных зависимостей общей суммы или отдельных статей затрат от важнейших параметров автомобиля. Аналогичный метод используется для определения отдельных статей затрат в эксплуатации (на ТО и ТР, на шины и др.) для электромобилей.

Годовые затраты на электроэнергию для электромобиля  $U_3$  устанавливаются по формуле

$$U_3 = \frac{3,65 Q_3 c_3 L_c \alpha}{\eta_6 \eta_3} \text{ руб.,} \quad (4.12)$$

где  $Q_3$  — удельный (на 1 км пробега) расход электроэнергии электромобилем, кВт · ч/км;  $c_3$  — цена электроэнергии, коп./кВт · ч;  $L_c$  — средний суточный пробег электромобиля, км;  $\alpha$  — коэффициент использования;  $\eta_6$  — КПД аккумуляторной батареи по энергии;  $\eta_3$  — КПД зарядного устройства.

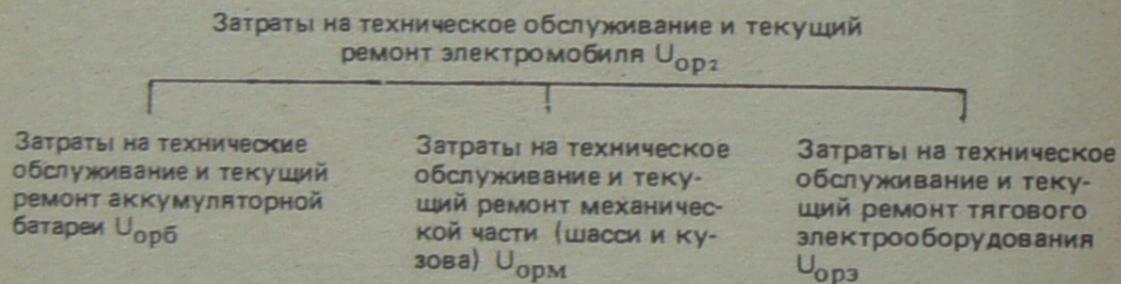
Годовые затраты на эксплуатационные материалы для электромобиля  $U_{м2}$  состоят из затрат на трансмиссионное масло, на консистентную смазку, на керосин и обтирочные материалы. В общих эксплуатационных расходах на эти затраты составляют весьма незначительную часть. Поэтому, пока нет достаточного опыта применения электромобилей, можно для данной статьи затрат использовать самый простой метод — применение поправочных коэффициентов к соответствующей статье затрат для однотипного (сравниваемого) автомобиля.

Вычитая из затрат на эксплуатационные материалы для автомобиля затраты на моторное масло и 50% затрат на трансмиссионное масло, получим, что для электромобиля затраты на эксплуатационные материалы можно принимать равными 0,25 от затрат для однотипного автомобиля.

Годовые затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт электромобиля  $U_{ор2}$  существенно зависят от типа применяемого оборудования, материалов и общей конструкции. Эта статья затрат является одной из важнейших.

Возможность довольно детального расчета затрат на техническое обслуживание и текущий ремонт электромобиля основана на том, что имеется достаточно большой опыт эксплуатации и обслуживания основных агрегатов и механизмов, из которых состоит электромобиль.

Описательное дерево целей исследования в данном случае может быть представлено в следующем виде:



Затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт аккумуляторной батареи  $U_{орб}$ . В настоящее время наибольший опыт эксплуатации аккумуляторных батарей накоплен на автотранспорте. Хотя речь идет о стартерных аккумуляторных батареях, тем не менее это важно и для электромобилей, так как они будут эксплуатироваться на тех же автотранспортных предприятиях с уже отработанными технологическими приемами, с прежним оборудованием и обслуживающим персоналом. Кроме того, следует указать, что по конструкции стартерные аккумуляторы очень близки к тяговым свинцовым аккумуляторам с пластинами намазного типа.

Анализ трудоемкости и затрат на техническое обслуживание и текущий ремонт автомобильных аккумуляторных батарей позволил установить корреляционные зависимости этих затрат от типа и основных параметров батареи — напряжения, запаса энергии  $W$  и периодичности обслуживания  $d$ .

Годовые затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт батареи для свинцовых аккумуляторов определяются следующими уравнениями:

для напряжения батареи около 140 В

$$U_{орбс140} = 14,6\alpha + \frac{3,65\alpha}{d} (58,7 + 0,19W^{0,8}) + 0,365\alpha L_c (0,15 + 0,01W), \text{ руб.}; \quad (4.13)$$

для напряжения батареи около 220 В

$$U_{орбс220} = 14,6\alpha + \frac{3,65\alpha}{d} (83,5 + 0,15W^{0,8}) + 0,365\alpha L_c (0,15 + 0,01W), \text{ руб.} \quad (4.14)$$

Для батареи железо-никелевых аккумуляторов, напряжение около 140 В

$$U_{орбж140} = 14,6\alpha + \frac{3,65\alpha}{d} (86,5 + 0,16W^{0,8}) + 0,365\alpha L_c (0,15 + 0,01W), \text{ руб.} \quad (4.15)$$

Для свинцовых аккумуляторов, оборудованных легкоъемными пробками, и напряжения батареи около 140 В,

$$U_{орбс140л} = 14,6\alpha + \frac{3,65\alpha}{d} (51,2 + 0,18W^{0,8}) + 0,365\alpha L_c (0,15 + 0,01W), \text{ руб.} \quad (4.16)$$

Для свинцовых и железо-никелевых аккумуляторов с централизованной доливкой воды практически для всего реально применяемого на электромобилях ряда напряжений

$$U_{орбд} = 14,6\alpha + \frac{3,65\alpha}{d} (40,6 + 0,16W^{0,8}) + 0,365\alpha L_c (0,15 + 0,01W), \text{ руб.} \quad (4.17)$$

Для любых типов аккумуляторов, не требующих проверки уровня электролита и прочистки вентиляционных отверстий (герметичные аккумуляторы):

$$U_{орбг} = 14,6\alpha + \frac{3,65\alpha}{d} (26,1 + 0,15W^{0,8}) + 0,365\alpha L_c (0,15 + 0,01W), \text{ руб.} \quad (4.18)$$

Затраты на техническое обслуживание (ТО) и текущий ремонт (ТР) механической части (шасси и кузова)  $U_{орм}$ . Для электромобилей, создаваемых на базе конструкции существующих автомобилей, эти затраты могут быть определены по существующим нормативам за вычетом величины затрат, связанных с двигателем и его системами.

Для электромобилей, имеющих оригинальную конструкцию, затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт механической части зависят от совершенства конструкции и качества изготовления. Исследование зависимости норм затрат на ТО и ТР от основного параметра механической части (шасси и кузов), каким является его сухая масса ( $G_c$ ), позволило получить следующие корреляционные уравнения:

для грузовых автомобилей

$$U_{орм} = 3,5 + 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot G_c \text{ руб./1000 км,} \quad (4.19)$$

для легковых автомобилей

$$U_{орм} = 4,0 + 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot G_c \text{ руб./1000 км,} \quad (4.20)$$

для автобусов

$$U_{орм} = 7,1 + 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot G_c \text{ руб./1000 км,} \quad (4.21)$$

С учетом полученных уравнений годовые затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт механической части (шасси и кузова) элек-

тромабиля можно определить следующим образом:

$$U_{\text{орм}} = U_{\text{орм}} L_2, \text{ руб.} \quad (4.22)$$

где  $L_2$  — годовой пробег, тыс. км.

**Затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт тягового электрооборудования  $U_{\text{орз}}$ .** Эти затраты зависят от совершенства конструкции тягового электродвигателя и системы его регулирования, от качества их изготовления, от условий эксплуатации. Очевидно, поэтому затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт тягового электрооборудования будут отличаться для разных моделей электромобилей в зависимости от режимов нагрузки, надежности оборудования, а также трудоемкости выполнения работ по техобслуживанию и ремонту.

Для предварительных расчетов могут быть использованы нормы затрат и трудоемкости, существующие для аналогичных автомобильных и трамвайных агрегатов.

**Годовые затраты на шины электромобиля  $U_{\text{ш2}}$ .** Норма затрат на 1 комплект шин зависит от нагрузки, типа конструкции шины, условий эксплуатации, особенностей конструкции автомобиля и т.д. Однако при этом, если в конструкции автомобильного транспортного средства не допущено недостатков, вызывающих повышенный износ шин, то для однотипных машин, т.е. при одинаковой нагрузке на шину, затраты для шин одинакового типа должны быть примерно равны. Поэтому можно при расчете затрат на шины электромобиля использовать средние, характерные для однотипных автомобилей значения.

**Годовые издержки автотранспортного предприятия, предназначенные на капитальный ремонт электромобиля  $U_{\text{кр2}}$ .** В настоящее время могут быть оценены лишь весьма приблизительно. При этом следует помнить, что затраты, связанные с заменой аккумуляторных батарей в течение всего срока службы электромобиля, учитываются отдельно, а срок службы тягового электрооборудования, судя по опыту эксплуатации троллейбусов и трамваев, может быть не меньше всего срока службы электромобиля. Следовательно, может требоваться капитальный ремонт только механической части (шасси и кузов) электромобиля, долговечность которой в настоящее время еще не определена.

Учитывая отсутствие у механической части электромобиля таких неизбежно изнашиваемых агрегатов, как двигатель внутреннего сгорания и коробка перемены передач, затраты на восстановление которых составляют значительную часть стоимости капитального ремонта, приблизительно можно принять, что нормы отчислений на капитальный ремонт электромобиля будут в 1,5–2,0 раза меньше, чем для однотипного автомобиля. При этом отчисления следует рассчитывать по стоимости одной механической части (шасси и кузов) электромобиля.

Сопутствующие капитальные вложения потребителя при использовании базового автомобиля  $K'_1$  и электромобиля  $K'_2$  должны различаться в основном только затратами на усиление энергохозяйства и организацию зарядных пунктов.

#### 4.2. ОПТИМИЗАЦИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ АККУМУЛЯТОРНОГО ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

Задача оптимизации может быть сформулирована следующим образом: определить значение основных параметров электромобиля, при которых его годовая эффективность будет иметь максимальное значение. Очевидно, что на начальной стадии возникает задача об определении

оптимальных значений хотя бы основных проектных параметров электромобиля, которые определяющим образом влияют на его эффективность и на весь процесс создания новой конструкции. Следовательно, к основным параметрам должны быть отнесены все те параметры, которые учитываются как наиболее существенные при оценке эффективности электромобиля. Исходя из этого определения, к основным параметрам заданного типа электромобиля (т.е. без упоминания параметров, характеризующих весь электромобиль в целом, — например, грузоподъемность, колесная формула) можно отнести (с указанием, на какие элементы эффективности они в основном влияют):

— тип аккумуляторной батареи (затраты на производство батареи, ее срок службы, затраты на техническое обслуживание);

— запас хода (масштабы применения и производства);

— собственная (без аккумуляторной батареи) масса электромобиля (затраты на производство механической части, затраты на техническое обслуживание);

— полная масса (затраты на шины, на производство тягового электрооборудования, на энергию);

— номинальная энергоемкость аккумуляторной батареи, вместо которой можно для определенного типа аккумуляторов использовать (зная удельную энергоемкость) массу батареи (затраты на производство батареи, затраты на техническое обслуживание, затраты на энергию).

Метод оптимизации представляет собой некоторый итерационный процесс, результат каждой итерации которого есть технически допустимое решение задачи проектирования

Проектные, весовые, стоимостные и другие соотношения, описывающие электромобиль, имеют определенную точность. Кроме того, в математической модели невозможно учесть все факторы, связанные с проектированием, изготовлением и эксплуатацией. Основной задачей оптимизации является определение не одного оптимального значения основных параметров, а области их значений, обеспечивающих эффективность более 80% от теоретически максимальной, т.е. решение задачи должно представляться в виде некоторой совокупности допустимых решений.

Следует еще раз отметить, что рассматриваются электромобили, обладающие динамическими и скоростными параметрами, необходимыми для движения в городском потоке автомобилей без его замедления. Следовательно, эти параметры должны задаваться и обеспечиваться во всей области исследования, ограничивая область допустимых решений.

Названные выше основные параметры электромобиля некоторым образом взаимосвязаны друг с другом.

Как уже отмечалось выше, вместо номинальной энергоемкости аккумуляторной батареи  $W_6$  можно рассматривать массу батареи  $G_6$ , кг, поскольку они связаны линейной зависимостью:

$$W_6 = w_6 G_6 10^{-3}, \text{ кВт} \cdot \text{ч.} \quad (4.23)$$

где  $w_6$  — удельная энергоемкость батареи данного типа, Вт·ч/кг.

Основные параметры массы электромобиля взаимосвязаны зависимостью

$$G_n = l(q + G_6), \text{ кг.} \quad (4.24)$$

где  $G_n$  — полная масса электромобиля, кг;  $l$  — коэффициент тары электромобиля;  $q$  — грузоподъемность, кг;  $G_6$  — масса батареи, кг.



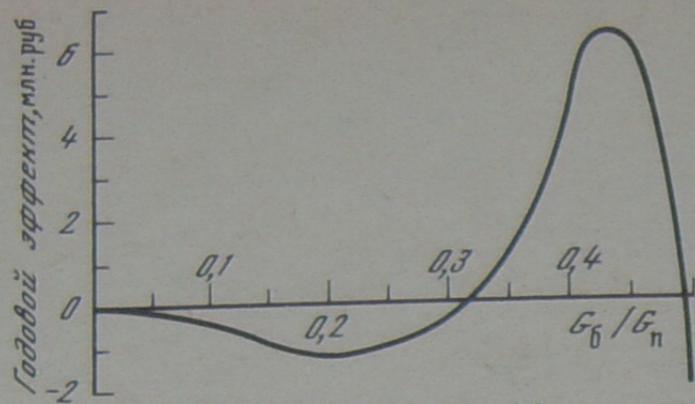


Рис. 42. Результаты расчета годовой экономической эффективности электромобиля особо малой грузоподъемности в зависимости от изменения отношения массы батареи к полной массе

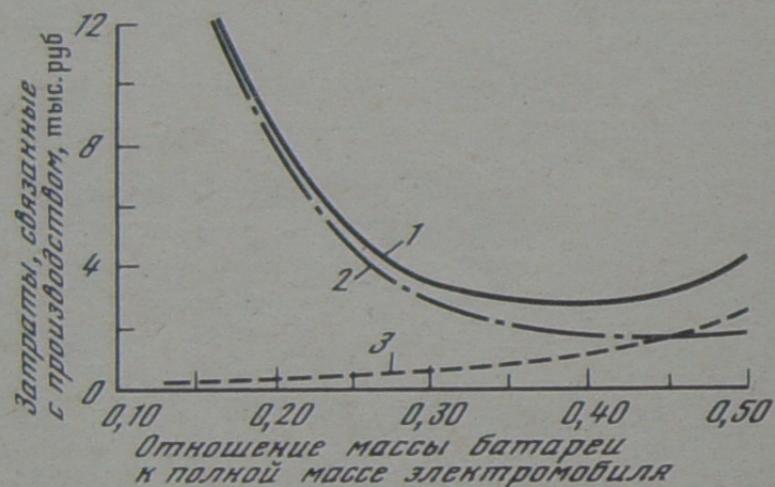


Рис. 43. Изменение затрат, связанных с производством: 1 — общие затраты; 2 — затраты на электромобиль без аккумуляторной батареи; 3 — затраты по аккумуляторной батарее

а также различие эксплуатационных затрат и экономического ущерба. При этом различие затрат на производство вычислено как затраты, связанные с электромобилем, минус затраты на автомобиль: для эксплуатационных затрат и экономического ущерба, наоборот, вычитаемыми были затраты, связанные с применением электромобиля. Поэтому данные рис. 46 позволяют провести графическое вычисление годовой эффективности в расчете на одну машину (см. заштрихованную область на графике).

На рис. 47 полученный (см. рис. 46) результат изменения годовой эффективности по одной машине  $\mathcal{E}_1$  показан совместно с графиком изменения масштабов возможного производства  $A_2$ . Из рисунка ясно следует, что перемножение  $\mathcal{E}_1 A_2$  дает зависимость изменения годовой эффективности, полученную при оптимизации (см. рис. 42).

Анализ данных рис. 43—47 показывает, что сложный характер зависимости эффективности электромобиля от его основных параметров (запас хода или отношение массы батареи к полной массе электромобиля) обуславливается следующим: при малых значениях  $G_6/G_n$  и запаса хода возможные масштабы применения (и соответственно производства) весьма ограничены, затраты на производство электромобиля в этом случае велики, а выигрыш за счет разницы эксплуатационных затрат (в первую очередь топлива и электроэнергии) ввиду малых пробегов очень



Рис. 44. Изменение годовых эксплуатационных затрат — годовые эксплуатационные затраты; — годовые затраты на топливо для автомобиля и на электроэнергию для электромобиля; 1 — электромобиль; 2 — автомобиль



Рис. 45. Изменение годового экономического ущерба 1 — электромобиль; 2 — автомобиль

незначителен, в результате электромобиль по сравнению с однотипным автомобилем получается неэффективным. На первом этапе увеличения запаса хода масштабы возможного применения растут очень медленно, поэтому отрицательный эффект увеличивается. В дальнейшем, по мере роста отношения  $G_6/G_n$  и соответственно запаса хода масштабы возможного применения начинают быстро возрастать, что ведет к уменьшению затрат на производство, одновременно на этом этапе имеет место увеличение разницы в затратах по эксплуатации за счет возрастания суточных пробегов, в результате эффективность становится положительной. На определенном этапе, как это было показано выше, увеличение масштаба производства уже не компенсирует затрат, связанных с увеличением массы электромобиля, одновременно начинает уменьшаться и разница затрат по эксплуатации, так как расход электроэнергии растет пропорционально росту полной массы электромобиля, повышаются также и другие затраты по эксплуатации электромобиля, в результате эффективность (с учетом растущих масштабов возможного применения) быстро падает.

Учитывая определенную приближенность расчета ряда исходных показателей и параметров, влияющих на эффективность, представляет интерес исследование влияния отдельных факторов на изменение эффективности оптимального варианта.

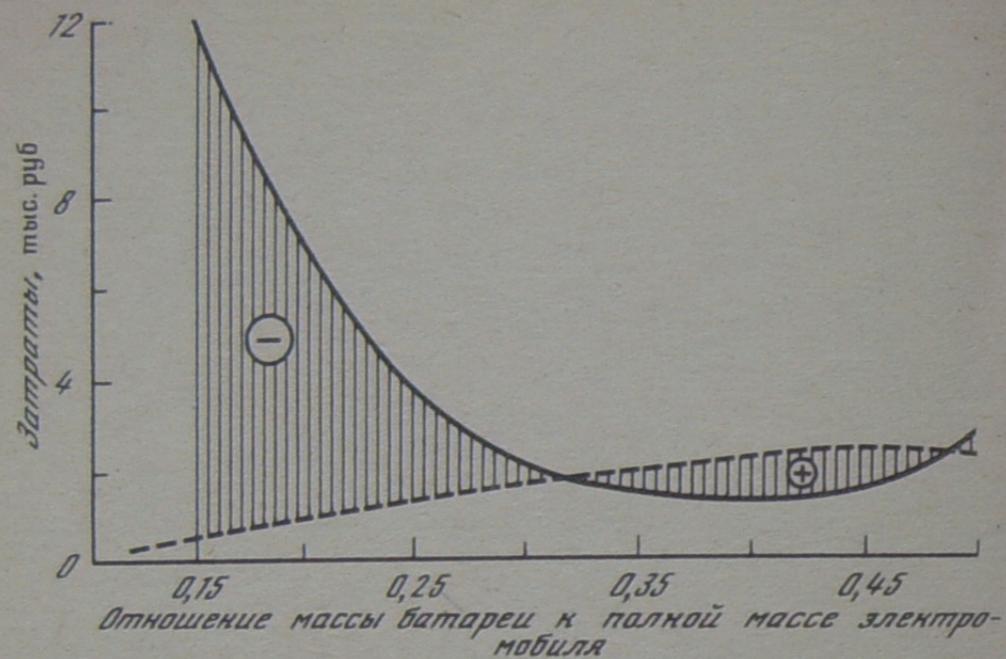


Рис. 46. Определение эффективности в расчете на один электромобиль  
 — разница затрат, связанных с производством электромобиля и автомобиля;  
 --- разница затрат, связанных с эксплуатацией и экономическим ущербом от загрязнения, между автомобилем и электромобилем

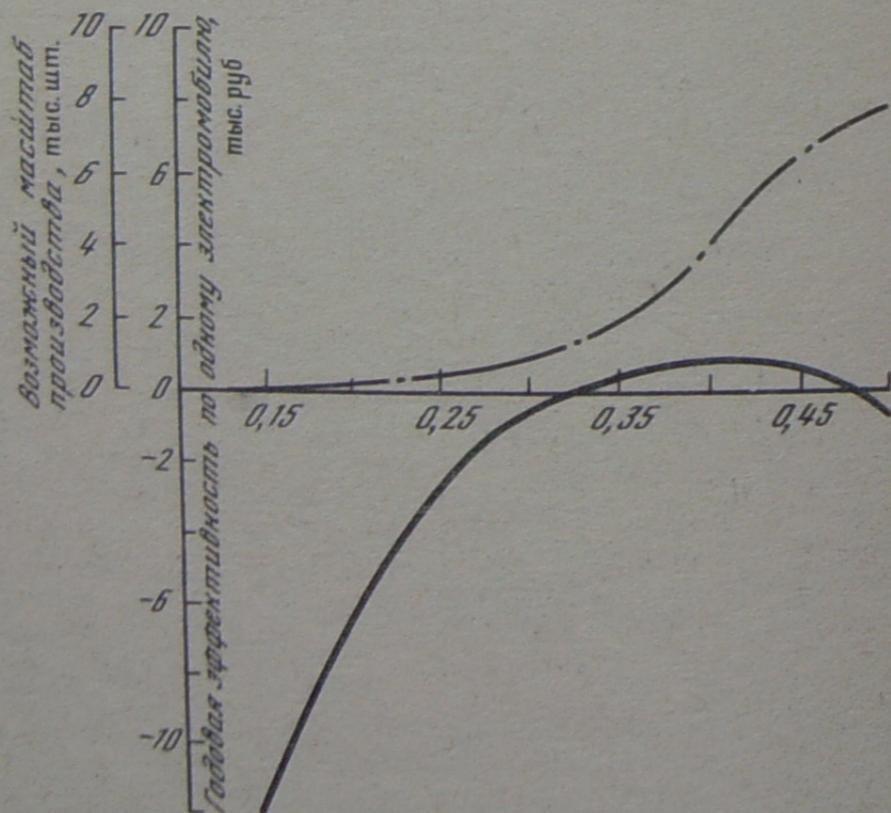


Рис. 47. Изменение возможных масштабов производства и эффективности в расчете на один электромобиль  
 — годовая эффективность по одному электромобилю; --- — возможный масштаб производства

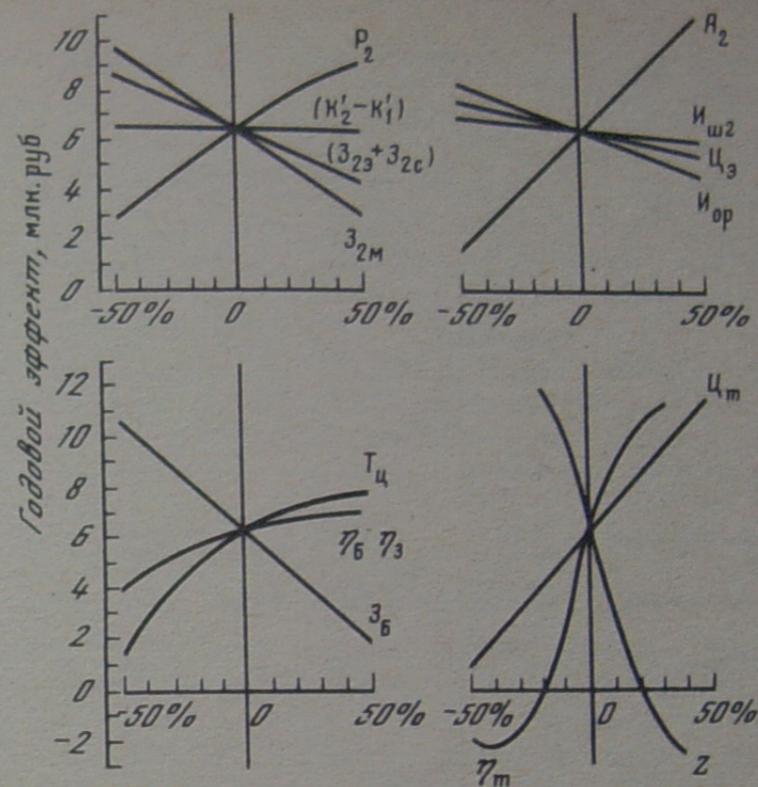


Рис. 48. Влияние отдельных факторов на эффективность оптимального варианта конструкции электромобиля

$P_2$  — срок службы электромобиля;  $A_2$  — масштаб возможного применения;  $(K'_2 - K'_1)$  — капвложения в эксплуатацию;  $(Z_{23} + Z_{2c})$  — затраты на тяговое электрооборудование;  $Z_{2m}$  — затраты на механическую часть;  $T_{ц}$  — срок службы батареи;  $\eta_b \eta_z$  — КПД батареи и зарядного устройства;  $Z_b$  — затраты на аккумуляторную батарею;  $I_{ш2}$  — затраты на шины;  $c_z$  — стоимость электроэнергии;  $I_{op}$  — затраты на ТО и ТР;  $c_t$  — цена автомобильного топлива;  $z$  — коэффициент тары электромобиля;  $\eta_t$  — КПД трансмиссии

Исследовалось влияние изменения значения срока службы электромобиля, величины различия размеров капвложений в эксплуатацию, размера затрат на производство тягового электрооборудования и механической части электромобиля, величины затрат на производство аккумуляторной батареи, значения срока службы батареи, величин КПД батареи и зарядного устройства, размера затрат на шины, на техническое обслуживание и текущий ремонт, стоимости автомобильного топлива и электроэнергии, масштаба возможного применения, величины КПД трансмиссии, значения коэффициента тары электромобиля.

Результаты проведенных расчетов представлены на рис. 48.

Полученные данные показывают, что изменение эксплуатационных и экономических параметров электромобилей в довольно широком интервале не делает оптимальный вариант неэффективным. В то же время изменение ряда технических параметров может сделать оптимальный вариант неэффективным. Следовательно, наблюдаемая в методике определения эффективности некоторая неточность расчета эксплуатационных и экономических параметров не должна оказывать решающего влияния на определение оптимального варианта и на общую эффективность электромобиля. Одновременно полученные данные показывают, что при создании электромобиля повышаются требования к обеспечению высоких прогрессивных значений ряда технических параметров: сопротивлению качению, КПД трансмиссии и особенно к величине собственной массы.

Таблица 19

Основные параметры ряда современных зарубежных грузовых электромобилей особо малой грузоподъемности

| Объект             | Параметры                                     | Фирма—модель (страна)                      |                               |                          |  |
|--------------------|---|--|-------------------------------|--------------------------|--|
|                    |   | CGE<br>(Франция)                           | "Харбилт"<br>(Англия)         | "Тойо—Когио"<br>(Япония) | "Коппер"<br>(США)                          |
| Батарея            | Тип   | Свинцовый                                  | Свинцовый                     | Свинцовый                | Свинцовый                                  |
|                    | Масса, кг                                     | 400  | 750                           | 450                      | 1100                                       |
|                    | Запас энергии,<br>кВт·ч                       | 10,5                                       | 19,8                          | 20,9                     | 31,0                                       |
|                    | Удельная энерго-<br>емкость, Вт·ч/кг          | 26,2                                       | 26,6                          | 46,5                     | 28,2                                       |
| Электро-<br>мобиль | Полная масса, кг                              | 1070                                       | 2010                          | 1540                     | 2630                                       |
|                    | Грузоподъемность,<br>кг                       | 100 + 1 чел.                               | 200 + 2 чел.                  | 300 + 2 чел.             | 454 + 2 чел.                               |
|                    | Удельная энерго-<br>вооруженность,<br>кВт·ч/т | 9,8  | 9,9                           | 13,6                     | 11,8                                       |
|                    | Отношение массы<br>батареи к полной<br>массе  | 0,373                                      | 0,373                         | 0,29                     | 0,42                                       |
|                    | Запас хода, км<br>(при условии)               | 70—100<br>(в город-<br>ских усло-<br>виях) | 60<br>(европей-<br>ский цикл) | 160<br>(при<br>40 км/ч)  | 86—110<br>(в город-<br>ских усло-<br>виях) |
|                    | Максимальная<br>скорость, км/ч                | 75   | 55                            | 70                       | 85   |

Результаты оптимизации основных параметров грузового электромобиля особо малой грузоподъемности дали результаты, очень близкие к данным ряда современных зарубежных электромобилей (табл.19).

Важнейшим вопросом является исследование влияния изменения основных параметров аккумуляторной батареи на значение оптимального соотношения  $G_Б/G_П$ . Важность этого вопроса обусловлена тем, что если для перспективных типов аккумуляторов значение оптимального отношения  $G_Б/G_П$  существенно отличается от соотношения для существующих типов аккумуляторов (т.е. для перспективных типов требуется иная конструкция), то целесообразность разработки специальной конструкции электромобиля, эффективной только для современных типов аккумуляторов, становится сомнительной.

Из основных параметров аккумуляторов наибольшие изменения требуются и ожидаются в отношении увеличения удельной энергоемкости и уменьшения удельной стоимости. Применительно к изменению этих параметров и были проведены расчеты, которые показали, что практически все возможные перспективные изменения основных параметров аккумуляторной батареи находятся в зоне рекомендуемых оптимальных соотношений массы батареи к полной массе электромобиля. Следовательно, электромобили, созданные с оптимальными параметрами для современных типов аккумуляторов, будут весьма близки к оптимальному варианту и для перспективных типов аккумуляторов. Учитывая, что на базе современных автомобилей без существенной их переделки невозможно обес-

печить оптимальные соотношения  $G_Б/G_П$ , уже в настоящее время необходима разработка специальных конструкций электромобилей.

Полученный вывод о том, что и при применении перспективных аккумуляторов, имеющих удельную энергоемкость в 4—5 раз выше, чем у современных аккумуляторов, электромобили будут иметь большое отношение  $G_Б/G_П$ , объяснимо также тем, что все равно по удельной энергоемкости перспективные аккумуляторы уступают бензиновому двигателю и поэтому масса батареи электромобиля будет больше массы двигателя с запасом топлива однотипного автомобиля.

Таким образом, возможность создания эффективного электромобиля с учетом реальных (или разрабатываемых) типов аккумуляторов определяется параметрами самого электромобиля и прежде всего заложенным в его конструкцию отношением массы батареи к полной массе.

#### 4.3. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АККУМУЛЯТОРНЫХ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

В последнее десятилетие в СССР было создано несколько различных опытных образцов электромобилей. Некоторые из них были выпущены небольшими партиями и поступили в опытную эксплуатацию. Однако проведенные испытания и опытная эксплуатация показали, что все опытные образцы имеют неудовлетворительные технико-экономические параметры и их практическое применение нецелесообразно.

Однако, как было показано, при наличии у электромобиля оптимальных значений основных параметров возможно создание конструкций, являющихся эффективными, с использованием современных типов аккумуляторов и, что не менее важно, конструкций, которые (основные соотношения масс) являются перспективными и для новых более энергоемких систем аккумуляторов. Поэтому применительно к современным типам аккумуляторов были проведены расчеты по оптимизации основных параметров различных типов электромобилей. При этом были сделаны следующие выводы.

1. Современный уровень науки и техники позволяет создать различные типы (грузовые и пассажирские) электромобилей, применение которых в ограниченных сферах будет экономически эффективным.

2. В настоящее время (при существующих ценах) эффективная конструкция электромобиля может быть создана только на базе использования никель-железных аккумуляторов.

3. Наиболее целесообразным типом конструкции электромобилей является специальная, максимально облегченная.

По результатам проведенных расчетов были разработаны требования к типажу электромобилей на базе современных типов аккумуляторов (табл. 20). В предлагаемый типаж вошли только те электромобили, применение которых является целесообразным в ближайшие годы.

Сравнение данных табл. 20 с параметрами опытных отечественных электромобилей позволяет выявить причины неудачных результатов по опытным образцам:

— на большинстве опытных образцов используются не никель-железные аккумуляторы;

— все опытные образцы имеют конструкции с отношением массы батареи к полной массе гораздо меньшим, чем то, которое обеспечивает оптимальные значения основных параметров, и как следствие этого — неудовлетворительная эффективность применения.

Таким образом, расширение использования электромобилей на совре-

Таблица 20

Требования к типу аккумуляторов на современных типах аккумуляторов

| Типы электромобилей | Грузоподъемность, т, вместимость, чел. | Тип аккумуляторной батареи | Отношение массы батареи к полной массе электромобиля | Запас хода (среднеэксплуатационный), км |
|---------------------|--|----------------------------|--|---|
| Грузовые            | 0,3                                    | Никель—железо              | 0,34—0,43  | 90—105                                  |
|                     | 1,0                                    | То же                      | 0,32—0,4   | 80—95                                   |
|                     | 1,5                                    | "                          | 0,3—0,36   | 70—85                                   |
|                     | (2,0)                                  | "                          |  |   |
| Автобусы            | 10                                     | "                          | 0,34—0,4   | 85—85                                   |
|                     | 25/80                                  | "                          | 0,32—0,4   | 80—95                                   |
| Легковые            | 4                                      | "                          | 0,34—0,43  | 90—105                                  |

менных типах аккумуляторов требует начать разработку специальных конструкций, отвечающих указанным в табл. 20 требованиям, для чего необходимо провести разработку конструкций механической части (шасси и кузова) электромобилей применительно к никель-железным аккумуляторам и доработать системы тягового электрооборудования в основном для повышения надежности и уменьшения стоимости.

Для установленного выше типажа электромобилей на современных типах аккумуляторов оценены масштабы возможного применения и объем транспортной работы электромобилей на современных типах аккумуляторов.

|  |       |
|--|-------|
| Возможные масштабы применения, тыс. шт., всего | 86—97 |
| в том числе                                    |       |
| грузовые (+ специальные)                       | 75—80 |
| легковые (служебные)                           | 10—15 |
| электробусы                                    | 1—2   |

|                                     |           |
|-------------------------------------|-----------|
| Возможный объем транспортной работы |           |
| грузооборот, млрд. ткм              | 0,21—0,22 |
| пассажирооборот, млрд. пасс.-км     | 0,5—0,9   |

Полученные данные показывают, что целесообразные размеры применения электромобилей на современных типах аккумуляторов весьма ограничены — не превышают 100 тыс. шт. Поэтому развитие использования электромобилей на современных типах аккумуляторов может оказать незначительное влияние на уменьшение расхода нефтяного топлива и на снижение загрязнения воздушного бассейна. Поэтому применение электромобилей на современных типах аккумуляторов обусловлено необходимостью иметь ко времени создания новых перспективных типов источников тока хорошо обработанную конструкцию электромобиля, производственную базу и некоторый опыт эксплуатации.

В настоящее время во многих странах ведутся целенаправленные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по усовершенствованию аккумуляторных батарей. Предполагается, что в ближайшие годы будут созданы для электромобилей усовершенствованные свинцовые, никель-железные или никель-цинковые аккумуляторы с удельной энергоемкостью 50—65 Вт·ч/кг.

Пока еще невозможно оценить экономическую эффективность электромобилей с усовершенствованными типами аккумуляторов. Однако можно утверждать, что в первую очередь их целесообразно будет применять для

тех же типов электромобилей, что и для современных аккумуляторов (см. табл. 20). Однако масштабы возможного применения электромобилей при этом существенно расширяются.

Ниже приведены данные о возможных масштабах применения и объема транспортной работы электромобилей на усовершенствованных типах аккумуляторов.

|  |         |
|--|---------|
| Возможные масштабы применения, тыс. шт., всего | 300—330 |
| в том числе                                    |         |
| грузовые (+ специальные)                       | 235—250 |
| легковые (служебные и такси)                   | 40—50   |
| электробусы                                    | 23—30   |

|                                     |           |
|-------------------------------------|-----------|
| Возможный объем транспортной работы |           |
| грузооборот, млрд. ткм              | 1,5—1,6   |
| пассажирооборот, млрд. пасс.-км     | 19,6—25,5 |

Из этих данных видно, что масштабы возможного применения электромобилей с усовершенствованными типами аккумуляторов хотя и растут (особенно по электробусам), но остаются весьма ограниченными: составляют около 300—330 тыс. шт. Поэтому развитие применения электромобилей на усовершенствованных типах аккумуляторов еще не решает проблем энергетики и экологии.

В настоящее время ведутся исследования ряда электрохимических систем (цинк—хлор, литий—сульфид железа, натрий—сера и др.), на основе которых могут быть созданы аккумуляторы с удельной энергоемкостью, в 2—3 раза и более превышающей этот параметр современных типов аккумуляторов, что позволит значительно повысить величину запаса хода электромобилей.

Из перспективных типов аккумуляторов в настоящее время наиболее разработанным представляется именно натрий-серный. Кроме высокой энергоемкости и высокой удельной мощности, к основным достоинствам натрий-серного аккумулятора относится простота конструкции, дешевизна и доступность основных материалов (натрий, сера, сульфиды, окись алюминия), стабильность характеристик. Отличительной особенностью этих аккумуляторов является протекание рабочего процесса при температурах около 300°С, что требует термоизоляции и подогрева при пуске.

Натрий-серный аккумулятор был запатентован фирмой „Форд“ (США) в 1967—1968 гг. в ряде стран. С этого времени начались интенсивные работы по созданию этого аккумулятора в США, Англии, Франции, Японии, а несколько позже и в ФРГ.

В США в настоящее время работы в области натрий-серных аккумуляторов, помимо фирмы „Форд“, ведут также такие крупные компании, как „Дженерал Электрик“, „Дюпон“, „Ай-Би-Эм“, ряд университетских лабораторий и др.

Наиболее существенные успехи в области развития натрий-серного аккумулятора достигнуты, вероятно, в Англии. Созданная здесь программа с участием ряда частных фирм, Британского управления железных дорог и Атомного центра в Харуэле привела к образованию специальной фирмы „Хлорайд Сайлент Пауэр Лимитэд“. В настоящее время завершены разработки батарей натрий-серных аккумуляторов и речь идет о создании промышленной технологии их производства. Фирма неоднократно заявляла, что предполагает начать массовый выпуск батарей натрий-серных аккумуляторов в 1980-е годы.

Во Франции значительный объем работ по натрий-серному аккумулятору выполняется фирмой „Женераль Электрисите“, которая также финансирует

Таблица 21

Запас хода электромобилей различных типов с перспективными типами аккумуляторов

| Характеристики  | Типы аккумуляторов |                   |              |                      |             |
|---|--------------------|-------------------|--------------|----------------------|-------------|
|   | цинк-воздушный     | никель-водородный | цинк-хлорный | литий-сульфид-железа | натрий-сера |
| Удельная энергоемкость аккумуляторной батареи (пятичасовой разряд), Вт · ч/кг | 70—90              | 80—100            | 110—150      | 110—150              | 150—180     |
| Отношение массы батарей к полной массе электромобиля                          |                    |                   |              |                      |             |
| грузовых малой грузоподъемности   | 0,35               | 0,34              | 0,33         | 0,33                 | 0,32        |
| грузовых средней грузоподъемности   | 0,32               | 0,31              | 0,3          | 0,3                  | 0,29        |
| грузовых большой грузоподъемности   | 0,29               | 0,28              | 0,27         | 0,27                 | 0,26        |
| легковых электробусов (больших)   | 0,36               | 0,35              | 0,34         | 0,34                 | 0,38        |
| электробусов (больших)  | 0,32               | 0,31              | 0,3          | 0,3                  | 0,29        |
| Средний эксплуатационный запас хода электромобиля, км                         |                    |                   |              |                      |             |
| грузовых малой грузоподъемности   | 150—195            | 170—205           | 220—300      | 220—300              | 280—340     |
| грузовых средней грузоподъемности   | 135—170            | 145—180           | 190—260      | 190—260              | 245—300     |
| грузовых большой грузоподъемности   | 115—150            | 130—160           | 160—220      | 160—220              | 210—250     |
| легковых электробусов (больших)   | 135—170            | 145—180           | 190—260      | 190—260              | 245—300     |

фундаментальные исследования в этой области, ведущиеся в ряде университетских лабораторий.

Интенсивные работы по натрий-серным аккумуляторам ведутся рядом японских фирм („Юаса дэнти“, „Наппон дэнти“ и др.). В ФРГ в последние годы реализуется программа исследований натрий-серного аккумулятора фирмой „Броун Бовери“, которая также предполагает начать массовый выпуск аккумуляторов в 1980-е годы.

Основные, пока еще не решенные проблемы внедрения натрий-серного аккумулятора следующие:

— освоение массового производства твердого электролита из бета-глинозема с воспроизводимыми характеристиками ионной проводимости, стабильностью;

— изыскание недефицитных и дешевых коррозионно-устойчивых материалов или покрытия для сосудов с расплавленным натрием и сульфидной смесью;

— отработка технологии герметичного соединения керамических и металлических деталей и сохранение устойчивости мест соединения при изменении температуры и при химическом воздействии расплавленных реагентов.

За последние годы за рубежом достигнуты определенные успехи в решении этих проблем: созданы макетные образцы батарей, имеющих емкость аккумуляторов несколько сот ампер-часов и напряжение около

100 В при пока ограниченном сроке службы (несколько десятков циклов); в ближайшее время предполагается достичь срока службы 500 циклов, а в дальнейшем — 2000 циклов.

В табл. 21 для различных типов перспективных аккумуляторов даны возможные значения запаса хода основных разновидностей электромобилей при характерных для них отношениях массы батареи к полной массе.

При создании электромобилей на базе перспективных аккумуляторов типа натрий-сера они смогут заменить (считая по наименьшему значению запаса хода) следующую часть автомобилей, эксплуатирующихся в городах:

грузовые малой и средней грузоподъемности, а также легковые служебные — практически полностью;

грузовые большой грузоподъемности — на 60—65%;

автобусы и легковые такси — на 75—80%.

Кроме того, легковые электромобили с запасом хода около 300 км могут наверняка применяться индивидуальными владельцами.

Очевидно также, что рядом организационных и административных мер можно ограничить максимальные суточные пробеги такси и автобусов величиной 250—300 км и, следовательно, обеспечить 100%-ное применение электромобилей на этих типах перевозок.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Великанов Д.П., Бернацкий В.И., Нифонтов Б.Н., Плеханов И.П. Автомобильные транспортные средства. М.: Транспорт, 1977. 326 с.
2. Галкин Ю.М. Электрические аккумуляторные автомобили (электромобили). М.: Л.: Наркомхоз РСФСР, 1938. 159 с.
3. Ставров О.А. Электромобили. М.: Транспорт, 1968. 104 с.
4. Ставров О.А. Электромобили (зарубежные). — В кн.: Итоги науки и техники. Автомобилестроение. М.: ВИНТИ, 1973, т. 1. 264 с.
5. Ставров О.А. Электромобили (зарубежные). — В кн.: Итоги науки и техники. Автомобилестроение. М.: ВИНТИ, 1976, т. 2. 160 с.
6. Breele Y. L'application des piles á combustible á la traction. — Ing. Automob., 1971, vol. 44, N 5, p. 269—279.
7. Ушаков С.С. Повышение эффективности новых видов тяги. М.: Трансжелдориздат, 1959. 303 с.
8. Бесчинский А.А., Коган Ю.М. Экономические проблемы электрификации. М.: Энергия, 1976. 424 с.
9. Скродцки Б.Г., Волат В.А. Техника и экономика тепловых электростанций. М.: Л.: Госэнергоиздат, 1963. 432 с.
10. Lapedes D.E., Meltzer J. An evaluation of hybrid heat engine/electric systems for low exhaust emission potential in automotive applications. — In: Intersoc. Energy convers. Eng. Conf., Boston (Mass.), 1971. N.Y., 1971, p. 1151—1162.
11. Багоцкий В.С. Новые электрохимические источники тока. — Вестн. АН СССР, 1976, № 7, с. 41—52.
12. Левинсон В.С. Химические источники тока. — В кн.: Итоги науки и техники. Генераторы прямого преобразования тепловой и химической энергии в электрическую. М.: ВИНТИ, 1975, т. 2. 254 с.
13. Розенфельд В.Е., Исавв И.П., Сидоров Н.Н. Электрическая тяга. М.: Трансжелдориздат, 1962. 347 с.
14. Степанов А.Д. Теплоэлектрический привод транспортных машин. М.: Машгиз, 1953. 256 с.
15. Розенфельд В.Е., Шевченко В.В., Майбога В.А., Долаберидзе Г.П. Тиристорное управление электрическим подвижным составом постоянного тока. М.: Транспорт, 1970. 240 с.
16. Аватков Е.С. Асинхронный тяговый привод для электроподвижного состава. — В кн.: Итоги науки и техники. Электрооборудование транспорта. М.: ВИНТИ, 1974, т. 2. 173 с.
17. Поляк Д.Г. Выбор электрооборудования аккумуляторных автомобилей (электромобилей). М., 1959. 40 с. (Тр. НАМИ; Вып. 4).
18. Великанов Д.П. Эффективность автомобиля. М.: Транспорт, 1969. 239 с.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| Введение .....   | 3  |
| <i>Глава 1</i>   |    |
| Особенности электромобилей и их эффективность в народном хозяйстве .....             | 4  |
| 1.1. Классификация и основные свойства электромобилей .....                          | 4  |
| 1.2. Энергетическая эффективность электромобилей .....                               | 8  |
| 1.3. Экологическая эффективность электромобилей .....                                | 15 |
| 1.4. Масштабы возможного применения и объем транспортной работы электромобилей ..... | 19 |
| <i>Глава 2</i>   |    |
| Энергетические установки электромобилей .....  | 26 |
| 2.1. Аккумуляторные батареи .....  | 26 |
| 2.2. Электрохимические генераторы .....  | 36 |
| 2.3. Комбинированные энергосиловые установки .....                                   | 40 |
| <i>Глава 3</i>   |    |
| Теоретические основы устройства и расчета технических параметров электромобиля ..... | 46 |
| 3.1. Основы теории движения .....  | 46 |
| 3.2. Тяговая характеристика электромобиля .....                                      | 49 |
| 3.3. Баланс энергии и методы расчета запаса хода электромобиля .....                 | 59 |
| <i>Глава 4</i>   |    |
| Возможность создания эффективного электромобиля .....                                | 64 |
| 4.1. Оценка экономической эффективности электромобиля .....                          | 64 |
| 4.2. Оптимизация основных параметров аккумуляторного электромобиля .....             | 74 |
| 4.3. Перспективы развития аккумуляторных электромобилей .....                        | 83 |
| Литература .....   | 87 |

Олег Анатольевич Ставров

## ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

*Утверждено к печати*

*Институтом комплексных транспортных проблем при Госплане СССР  
и Научным советом по комплексным проблемам перспективных транспортных средств  
и транспортной энергетике АН СССР*

Редактор Э.А. Лемберг. Редактор издательства М.М. Гальперин  
Художник В.П. Покусаев. Художественный редактор И.А. Фильчагина  
Технический редактор О.В. Аредова. Корректор Р.Г. Ухина

Набор выполнен в издательстве на наборно-печатающих автоматах

ИБ № 28108

Подписано к печати 19.10.84. Т—19840. Формат 60 X 90 1/16. Бумага офсетная № 2  
Гарнитура Универс. Печать офсетная. Усл.печ.л. 5,5. Усл.кр.-отт. 5,7. Уч.-изд.л. 6,8

Тираж 1200 экз. Тип. зак. 1849. Цена 1 руб.

Издательство "Наука", 117864 ГСП-7, Москва В-485, Профсоюзная ул., д. 90  
Ордена Трудового Красного Знамени 1-я типография издательства "Наука"  
199034, Ленинград, В-34, 9-я линия, 12